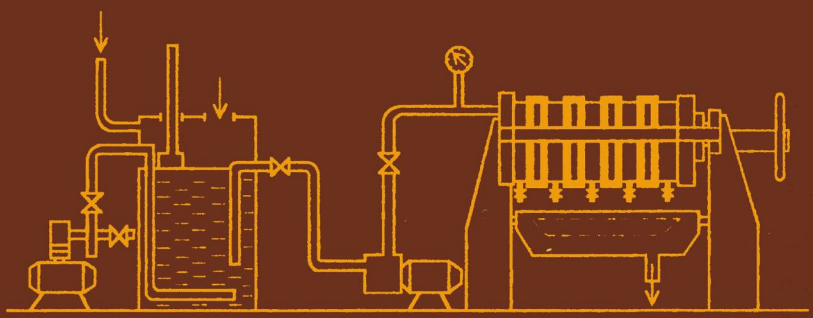
KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

• Alfredas Balandis • Aras Kantautas • Benonas Leskauskas •
• Giedrius Vaickelionis • Zenonas Valančius •

CHEMIJOS INŽINERIJA

I knyga



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Alfredas BALANDIS, Aras KANTAUTAS,
Benonas LESKAUSKAS, Giedrius VAICKELIONIS,
Zenonas VALANČIUS

CHEMIJOS INŽINERIJA

I knyga

Vadovėlis

Scanned by
Cloud Dancing

TECHNOLOGIJA
KAUNAS • 2006

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos Aukštųjų mokyklų bendrųjų vadovėlių leidybos komisijos rekomenduota 2005-12-23, Nr. A-271.
Išleista Švietimo ir mokslo ministerijos lėšomis

Recenzavo:
vyr.m.b. dr. A. Kukliauskas (Lietuvos energetikos institutas)
vyr.m.b. dr. R. Levinskas (Lietuvos energetikos institutas)

Moksliniai ekspertai:
prof. habil. dr. V. Zabukas (Klaipėdos universitetas)
prof. habil. dr. R. Makuška (Vilniaus universitetas)

Šio vadovėlio rengimą rėmė Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas

Be raštiško leidyklos „Technologija" sutikimo nė viena šios knygos dalis jokiais tikslais ir jokiomis priemonėmis neturi būti kopijuojama.

© Alfredas Balandis, Aras Kantautas,
Benonas Leskauskas, Giedrius Vaickelionis,
Zenonas Valančius,
2006
© Leidykla „Technologija", 2006

ISBN 9955-25-100-X

TURINYS

Pratarmė 7
Įvadas 8
Chemijos inžinerijos kurso objektas ir uždaviniai 11
Pagrindinių cheminės technologijos procesų klasifikacija 12
Cheminės technologijos procesų teoriniai pagrindai 14
1 dalis. Tvermės dėsniai 17
1.1. Masės tvermės dėsnis 17
1.2. Energijos tvermės dėsnis 20
1.3. Impulso tvermės dėsnis 23
2 dalis. Pusiausvyros dėsningumai 25
2.1. Termodinaminės pusiausvyros sąlygos 25
2.2. Fazių taisyklė 28
2.3. Pusiausvyros lygtys ir linijos 29
3 dalis. Impulso, energijos ir masės pernašos dėsniai 33
3.1. Bendrosios hidraulikos žinios 33
3.1.1. Realų skystį veikiančios jėgos 34
3.1.2. Pagrindinės srauto charakteristikos 40
3.2. Pagrindinė substancijos pernašos lygtis 46
3.2.1. Vientisojo srauto dėsnis 50
3.2.2. Šilumos pernašos lygtis 54
3.2.3. Masės pernašos lygtis 55
3.2.4. Judėjimo kiekio pernašos lygtys 56
4 dalis. Cheminės technologijos procesų modeliavimas 65
4.1. Apibendrintų kintamųjų metodas 66
4.2. Matmenų analizės metodas 71
4.3. Analitinis apibendrintų kintamųjų gavimo metodas 72
4.4. Hidrodinaminių procesų panašumas 73
4.5. Matematinis modeliavimas 77
5 dalis. Srautų hidrodinaminė struktūra 81
5.1. Srauto dalelių judėjimas ir buvimo cheminiuose aparatuose trukmė 81
5.2. Idealizuoti srautų hidrodinaminės struktūros modeliai 86
5.3. Realiųjų srautų struktūros hidrodinaminiai modeliai 89
6 dalis. Hidromechaniniai procesai ir aparatai 95
6.1. Pagrindinė hidrostatikos lygtis 95
6.1.1. Rimties būsenos skysčio slėgis į indo dugną ir sieneles 97
6.1.2. Hidrostatinės mašinos 98

6.1.3. Slėgio matavimo prietaisai 99
6.1.4. Skysčio kiekio rezervuaruose išmatavimas 100
6.2. Bernulio lygtis 101
6.3. Hageno ir Puazeilio lygtis 105
6.4. Vamzdynų ir aparatų hidraulinis pasipriešinimas 106
6.5. Vamzdynų ir aparatų skersmens skaičiavimas 111
6.6. Skysčių ištekėjimas pro angas ir antgalius 112
6.7. Skysčio ir dujų debito matavimas 115
6.8. Skysčių aptekėjimas apie kietuosius kūnus 119
6.9. Skysčio judėjimas per grūdinės medžiagos arba įkrovos sluoksnį 124
6.9.1. Srauto judėjimas per nejudantį grūdinį sluoksnį 124
6.9.2. Pseudoverdančiojo sluoksnio hidrodinamika 127
6.10. Plėvelinis skysčio judėjimas 132
6.11. Barbotažo hidrodinamika 137
6.12. Skysčių dispergavimas 140
6.12.1. Skysčių dispergavimo metodai 141
6.12.2. Lašų smulkinimas 145
6.13. Neniutoninių skysčių tekėjimas 148
7 dalis. Maišymas 153
7.1. Mechaninis maišymas 155
7.1.1. Skysčio judėjimas aparatuose su maišikliu 155
7.1.2. Maišyklių skaičiavimas 159
7.1.3. Maišyklių konstrukcija 167
7.2. Pneumatinis maišymas 172
7.3. Cirkuliacinis maišymas 174
7.4. Specialieji maišymo būdai 175
8 dalis. Skysčių transportavimas 177
8.1. Pagrindiniai siurblių parametrai 178
8.2. Tūriniai siurbliai 182
8.2.1. Stūmokliniai siurbliai 182
8.2.2. Krumpliaratiniai siurbliai 190
8.2.3. Sraigtiniai siurbliai 191
8.2.4. Plokštiniai rotaciniai siurbliai 192
8.2.5. Pneumatiniai skysčio kėlikliai 193
8.3. Dinaminiai siurbliai 194
8.3.1. Išcentriniai siurbliai 194
8.3.2. Sūkuriniai siurbliai 204
8.3.3. Ašiniai siurbliai 206
8.3.4. Čiurkšliniai siurbliai 206
8.3.5. Oriniai skysčio kėlikliai 207
8.4. Įvairių tipų siurblių teigiamybės ir trūkumai 209

9 dalis. Dujų suslėgimas ir transportavimas 211
9.1. Dujų slėgimo termodinamikos pradmenys 213
9.2. Tūrinės kompresorinės mašinos 219
9.2.1. Stūmokliniai kompresoriai 220
9.2.2. Rotacinės kompresorinės mašinos 227
9.3. Dinaminės kompresorinės mašinos 230
9.4. Vakuuminiai siurbliai 233
10 dalis. Nevienalyčių sistemų perskyrimas 235
10.1. Nevienalyčių sistemų ir jų perskyrimo metodų klasifikavimas 235
10.2. Nusodinimas 238
10.2.1. Nusodinimas sunkio jėga 238
10.2.2. Nusodintuvai 246
10.2.3. Nusodinimas išcentrine jėga 251
10.2.4. Ciklonai ir nusodinamosios centrifugos 253
10.2.5. Nusodinimas elektriniame lauke 262
10.2.6. Elektriniai filtrai 265
10.3. Filtravimas 266
10.3.1. Filtrai 278
10.3.2 Filtruojamosios centrifugos 291
10.4. Šlapiasis dujų valymas 295
10.5. Aparato parinkimas nevienalytėms sistemoms perskirti 302
10.6. Nevienalyčių sistemų perskyrimo procesų paspartinimo ir efektyvumo padidinimo metodai 303
11 dalis. Mechaniniai procesai 307
11.1. Smulkinimas 307
11.1.1. Pagrindiniai smulkinimo proceso rodikliai 308
11.1.2. Mechaniniai kietųjų medžiagų smulkinimo būdai 313
11.1.3. Teoriniai smulkinimo pagrindai 314
11.1.4. Smulkinimo įrenginių skirstymas, smulkinimo stadijos ir ciklai 320
11.1.5. Bendrieji reikalavimai smulkinimo įrenginiams 322
11.1.6. Trupintuvai 323
11.1.6.1. Žiauniniai trupintuvai 323
11.1.6.2. Kūginiai trupintuvai 333
11.1.6.3. Valciniai trupintuvai 338
11.1.6.4. Bėgūnai 345
11.1.6.5. Plaktukiniai trupintuvai ir malūnai 350
11.1.6.6. Dezintegratoriai ir dismembratoriai 354
11.2. Malimas 356
11.2.1. Malimo procesų dėsningumai 356

11.2.2. Malūnai 358
11.2.2.1. Rutuliniai malūnai 363
11.2.3. Malimo procesų optimizavimas ir intensyvinimas 367
11.2.4. Suspensijų dispergavimo malūnai 371
11.3. Minkštų augalinės ir gyvulinės kilmės medžiagų smulkinimo įrenginiai 374
11.4. Susmulkintų medžiagų klasifikavimas 379
11.4.1. Sijojimas. Bendros sijojimo procesų charakteristikos 380
11.4.2. Hidraulinė klasifikacija 390
11.4.3. Orinė susmulkintų dalelių separacija 392
11.4.4. Trėjeriai 394
11.4.5. Inercinė-gravitacinė separacija 395
11.4.6. Magnetinė separacija 397
11.5. Presavimas 399
11.5.1. Skysčių išskyrimas iš šlapių medžiagų presavimu 399
11.5.2. Plastiškų masių presavimas 403
11.5.3. Birių medžiagų presavimas 406
11.6. Granuliavimas 407
11.7. Biriųjų ir plastiškųjų medžiagų maišymas 412
11.8. Plastiškų masių maišytuvai 418
11.9. Suspensijų, šlamų ir tešlų maišymas 419
11. 10. Birių medžiagų transportavimas 421
11.10.1. Transportuojamų medžiagų savybės 422
11.10.2. Juostiniai transporteriai 427
11.10.3. Grandininiai transporteriai 437
11.10.4. Grandikliniai transporteriai 438
11.10.5. Kaušiniai elevatoriai 440
11.10.6. Sraigtiniai transporteriai 442
11.10.7. Ritinėliniai transporteriai 446
11.11. Pneumatinis transportas 447
PRIEDAI 457
Panašumo kriterijai ir kiti kompleksai 457
Tarptautinė vienetų sistema SI 458
Svarbesniųjų matavimo vienetų perskaičiavimo lentelė 464
Matematikos ženklų simbolika 466
Vadovėlyje vartojamos graikų ir lotynų kalbų raidės 466
LITERATŪRA 467
DALYKINĖ RODYKLĖ 468

PRATARMĖ

„Chemijos inžinerijos“ vadovėlis skirtas universitetų studentams, studijuojantiems chemijos inžinerijos kursą. Vadovėlyje pateikti ir susisteminti teoriniai duomenys apie visus svarbiausius dabar žinomus chemijos inžinerijos technologinius procesus, todėl juo galės naudotis chemijos, maisto, farmacijos pramonėje bei inžinerinės ekologijos srityje dirbantys inžinieriai ir technikai.

Šiuo metu pagrindinis chemijos inžinerijos studijų vadovėlis lietuvių kalba yra J. Cipario, E. Daumanto, A. Drobavičiaus, A. Novodvorskio ir K. Sasnausko „Cheminės technologijos procesai ir aparatai“, kurio antrasis pataisytas ir papildytas leidimas išėjo 1984 m.

Per pastaruosius dešimtmečius ne tik atsirado naujais principais pagrįsti procesai, bet ir visa chemijos inžinerija pasiekė kokybiškai naują lygį. Prie to prisidėjo spartus skaičiavimo technikos tobulėjimas, nes šiuolaikiniai kompiuteriai įgalina išsamiai tirti, modeliuoti, skaičiuoti ir valdyti cheminės technologijos procesus. Daugelio šalių mokslininkų pastangomis „Chemijos inžinerijos“ kursas, iki praeito amžiaus vidurio aprašinėjęs tik atskirus procesus, tapo viena iš pagrindinių mokslinių disciplinų rengiant cheminės technologijos specialistus.

Todėl ir Lietuvoje atsirado būtinybė chemijos inžinerijos teorijos studijoms parengti naują vadovėlį.

Autoriai dėkingi recenzentams technikos mokslų daktarams Adolfui Kukliauskui ir Rimantui Levinskui (Lietuvos energetikos institutas), mokslininiams ekspertams prof. habil. dr. Vyteniui Zabukui (Klaipėdos universitetas) ir prof. habil. dr. Ričardui Makuškai (Vilniaus universitetas), taip pat visiems, konkrečiais darbais, vertingomis pastabomis prisidėjusiems rengiant ir išleidžiant vadovėlį.

ĮVADAS

Džiovinimo, distiliacijos ir rektifikacijos, filtravimo, nusodinimo, garinimo ir kitus procesus žmonės naudoja jau labai seniai. Tačiau chemijos ir maisto bei farmacijos pramonė pradėjo vystytis tik devynioliktojo amžiaus pradžioje. Pirmųjų chemijos fabrikų įrenginiai mažai skyrėsi nuo chemijos laboratorinių. Didėjant gamybos mastams, prireikė našesnių aparatų, o juos gaminant susidurta su sunkumais: padidinus kai kurių aparatų matmenis, paaiškėjo, kad negalima įprastiniu būdu valdyti proceso eigos, nes, kai reaguoja dideli medžiagų kiekiai, procesai vyksta visiškai kitaip, negu tada, kai reaguoja maži jų kiekiai. Chemijos pramonės specialistams ir mokslininkams, be chemijos dėsningumų, reikėjo išmokti taikyti ir fizikinės chemijos, fizikos ir mechanikos dėsningumus. Prireikė išnagrinėti naujas procesų vyksmo sąlygas, sukurti naujas mašinas ir aparatus. Taip atsirado nauja mokslo šaka – chemijos inžinerija, kuri vėliau tapo pagrindine disciplina rengiant inžinierius chemikus ir augo kartu su pramonės poreikiais, panaudodama kitų, taigi ir naujai atsirandančių, mokslo šakų laimėjimus.

Chemijos inžinerijos paskirtis buvo tokia: apibendrinant pagrindinių cheminės technologijos procesų ir kitų mokslo ir pramonės šakų dėsningumus, sudaryti procesų ir aparatų skaičiavimo ir eksploatavimo optimaliomis sąlygomis galimybes.

Paskaitos apie chemijos pramonės procesus ir aparatus, jų skaičiavimą ir projektavimą būsimiesiems inžinieriams chemikams pradėtos skaityti XIX a. pabaigoje ir XX a. pradžioje skirtingais pavadinimais: „Unit operations", „Principles of Chemical Engineering" – JAV ir Anglijoje; „Процессы и аппараты химической технологии" – Rusijoje.

Dvidešimtojo amžiaus 3 ir 4 dešimtmečiais buvo išleisti pirmieji chemijos inžinerijos arba cheminės technologijos procesų ir aparatų vadovėliai. Nors įvairiose pasaulio šalyse jų pavadinimai buvo skirtingi, nurodomas skirtingas jų parengimo pirmumas, bet turiniai yra panašūs.

Lietuvoje intensyvesnės chemijos inžinerijos (pradžioje cheminės technologijos procesų ir aparatų pavadinimu) studijos, ėmus rengti daugiau chemikų technologų, prasidėjo XX a. 5-ajame dešimtmetyje. Iki 1966 metų, nors studijos vyko lietuvių kalba, iš esmės buvo naudojamasi Rusijoje išleistais vadovėliais; kitose šalyse išleisti vadovėliai buvo sunkiai prieinami.

J. Cipario, E. Daumanto, A. Drobavičiaus, A. Novodvorskio ir K. Sasnausko 1966 m. išleistas „Cheminės technologijos procesų ir aparatų" vadovėlis, mūsų žiniomis, buvo pirmasis chemijos inžinerijos vadovėlis lietuvių kalba. 1984 m. išėjo antrasis pataisytas ir papildytas šio vadovėlio leidimas.

Chemijos, maisto, farmacijos, statybinių medžiagų, trąšų, polimerų, naftos ir kitų gamybų technologiniai procesai yra labai įvairūs; perdirbamos įvairios žaliavos ir gaminami skirtingų fizikinių ir cheminių savybių produktai. Skirtingos gamybos dažnai sudarytos iš nedidelio skaičiaus tipinių procesų: maišymo, filtravimo, šildymo, aušinimo, džiovinimo ir kt. Chemijos inžinerijos objektą ir turinį sudaro šių procesų teoriniai pagrindai, jų skaičiavimo metodai ir tinkamiausių aparatų tam tikram procesui vykdyti parinkimas, procesų valdymas ir kontrolė.

Vadovėlis skirtas universitetinėms chemijos inžinerijos studijoms. Jo struktūra parinkta tokia, kad studentas kiekvieną konkretų procesą nagrinėtų iš bendrų teorinių ir inžinerinių pozicijų. Dėl didelės apimties medžiaga pateikiama dviejose maždaug vienodos apimties knygose. Pirmoje knygoje nagrinėjami chemijos inžinerijos teoriniai pagrindai, cheminių technologinių objektų modeliavimas, hidromechaniniai, skysčių transportavimo, dujų suslėgimo ir transportavimo, skysčių maišymo bei maišymo skysčiuose, nevienalyčių sistemų perskyrimo bei mechaniniai procesai ir šiems procesams atlikti dažniausiai naudojami aparatai. Antroje knygoje nagrinėjami šilumos ir masės mainų (šildymo, aušinimo šaldymo, kondensacijos, garinimo, sorbcijos, distiliacijos ir rektifikacijos, ekstrakcijos, tirpimo ir kristalizacijos, džiovinimo ir membraniniai) procesai ir jiems atlikti naudojami aparatai.

Vadovėlio pirmosiose penkiose dalyse pateikti cheminės technologijos procesų teoriniai pagrindai, kitas dalis sujungiantys į vieną visumą. Visi šiose dalyse nagrinėjami klausimai – impulso, energijos (šilumos) ir masės tvermės, pusiausvyros ir pernešimo dėsniai, cheminės technologijos procesų modeliavimas ir srautų hidrodinaminė struktūra chemijos aparatuose yra teorinis tipinių procesų (hidrodinaminių, šilumos ir masės mainų) pagrindas.

Kiekviena kita dalis remiasi pirmųjų penkių dalių medžiaga, pritaikant ją nagrinėjamai tipinių procesų klasei ir išplečiant bei panaudojant bendruosius teorinius dėsningumus konkretiems procesams. Kituose šitų dalių skyriuose nagrinėjamos pusiausvyros sąlygos, medžiagų balansų sudarymo principai ir pavyzdžiai, konkretaus proceso fizikinė cheminė esmė ir kinetika, jo matematinis aprašymas (modelis), taip pat procesams atlikti naudojamų konkrečių aparatų konstrukcijos, veikimo principai, skaičiavimai ir charakteristikų palyginimai.

Vadovėlyje pabrėžiami dėstomos disciplinos ryšiai su kitomis (anksčiau klausytomis, lygiagrečiai studijuojamomis bei ateityje studijuosimomis) disciplinomis, tarp tos pačios disciplinos dalių, o atskiros dalies viduje – tarp atskirų tos dalies skyrių.

Chemijos inžinerijos atveju būtina pabrėžti jos ryšį su aukštąja matematika, fizika, fizikine chemija (daugiausia su termodinamika ir cheminių reakcijų kinetika), taip pat su kai kuriais kitais moduliais.

Šiuolaikiniuose chemijos inžinerijos vadovėliuose analizuojami tradiciniai technologiniai procesai: kietų medžiagų smulkinimas, klasifikacija, transportavimas, šaldymas ir kt. Į vadovėlį įtraukėme ir tokius aktualius technologinius procesus, kaip ekstrakcija iš kietų medžiagų, presavimas, pjaustymas, granuliavimas, srautų hidrodinaminė struktūra; praplėtėme membraninių procesų, modeliavimo skyrius ir kt.

Aparatų, kuriuose vyksta nagrinėjamas procesas, konstrukcija pateikiama schemiškai, stilizuotai, be neesminių chemijos inžinerijos požiūriu elementų, jų darbas aprašomas glaustai. Pagrindinis tikslas – pateikti studentams aparatų, kuriuose vykdomas analizuojamas procesas, darbo principo aprašymą ir minimalių dalinių praktinių rekomendacijų. Smulkiau išnagrinėtus visus šiuos klausimus galima rasti literatūros sąrašuose nurodytuose šaltiniuose.

CHEMIJOS INŽINERIJOS KURSO OBJEKTAS IR UŽDAVINIAI

Gamtinių žaliavų ir technologinių medžiagų būklės pakeitimas vienomis ar kitomis sąlygomis yra vadinamas technologiniu procesu. Aplinkoje vykstantys reiškiniai (pvz., garavimas nuo vandens telkinių paviršiaus, žemės paviršiaus šilimas arba aušimas veikiant įvairiems veiksniams) vadinami gamtiniais procesais. Gamtinius procesus tiria fizika, chemija ir kiti gamtos mokslai. Naudojant gamybos procesuose gamtos mokslų pasiekimus ir įvairius technologinius įrenginius ir aparatus, gamtinės žaliavos perdirbamos į gamybos priemones ir vartojimo reikmenis. Tokie procesai vadinami gamybiniais arba technologiniais.

Technologinių procesų tyrimas yra technologijos objektas ir uždaviniai. Žodis *technologija* yra kilęs iš graikų kalbos žodžių: *techne* – amatas, menas, meistriškumas, mokėjimas ir *logos* – mokslas. Technologija – mokslas, nusakantis gamtos mokslų (fizikos, chemijos ir kitų) dėsnių taikymą technologiniams procesams efektyviai atlikti. Technologija tiesiogiai siejasi su gamyba, o gamyba nuolat kinta ir tobulėja. Todėl esamas technologinio proceso variantas negali būti nagrinėjamas kaip visiškai užbaigtas.

Cheminės technologijos procesų metu, skirtingai negu mechaninių procesų metu, ne tik kinta medžiagų fizikinės savybės, bet ir susidaro kitos sudėties ir savybių medžiagos, ir tai gali sietis su agregatinės būklės pasikeitimu. Parenkant aparatus cheminiams procesams atlikti, labai svarbu atsižvelgti į įvairius veiksnius: temperatūrą, slėgį, medžiagų chemines savybes ir kitus technologinius parametrus, nusakančius cheminės technologijos proceso sąlygas. Daugumą procesų galima atlikti keliais būdais ir naudojant skirtingus aparatus. Proceso atlikimo metodas ir naudojamas aparatas parenkamas atlikus jų optimizaciją, t. y. ieškant geriausio varianto.

Šiuolaikinė chemijos inžinerija nagrinėja įvairių rūgščių, šarmų, druskų, trąšų ir kitų cheminių medžiagų, maisto produktų, statybinių ir kitų medžiagų gamybą, taip pat naftos, akmens anglių ir kitų žaliavų perdirbimą. Nors chemijos pramonės produktai labai įvairūs, jų gamyboje naudojami tie patys procesai (pvz., skysčių arba dujų maišymas, šildymas, aušinimas, šaldymas, cheminis arba biologinis pakeitimas), apibūdinami bendrais hidromechanikos, fizikos, fizikinės chemijos, cheminės kinetikos ir kietųjų kūnų fizikos dėsniais. Dažnai sutampa ir skirtingų produktų gamyboje naudojami aparatai. Pvz., dažai, polimerai, vaistai ir kitos medžiagos džiovinamos to paties tipo, bet skirtingo dydžio konvekcinėse džiovyklose.

Įvairių procesų ir aparatų bendrumų nustatymas, jų skaičiavimo metodų apibendrinimas yra svarbus chemijos inžinerijos elementas. Chemijos inžine-

rijos kurse nagrinėjama procesų fizikinė cheminė esmė ir teorija, būdinga visoms cheminės technologijos šakoms, taip pat apžvelgiami procesui skirtų aparatų parinkimo ir skaičiavimo principai.

Pastaraisiais dešimtmečiais žmonija yra priversta spręsti ir ekologines problemas. Žmonės kūrė gamybą kaip atvirą sistemą, į kurią reikia pateikti tam tikrą kiekį gamtinių žaliavų ir procesui atlikti reikalingą energijos kiekį. Iš sistemos reikia pašalinti pagamintus produktus, neperdirbtas žaliavas, energijos (šilumos) perteklių, nes tai stabdo technologinį procesą. Tokia atvira gamyba ilgesnį laiką gali egzistuoti tik esant nedideliems našumams. Kai našumai dideli, gamyba tampa žalinga aplinkai, nes labai padidėja teršalų kiekis. Tolesnis jų daugėjimas gali sugriauti uždarą ciklą, pagal kurį organizuojamas gyvenimas mūsų planetoje.

Technologijų be atliekų tyrimu užsiima nanotechnologija – nauja mokslo kryptis, nagrinėjanti, kaip iš atskirų atomų gauti norimų savybių medžiagas. Tam reikalinga labai sudėtinga technika, leidžianti į reikiamą molekulės vietą įterpti norimą atomą. Tačiau nanotechnologija daro tik pirmuosius žingsnius, todėl praktinius jos rezultatus pajusime tik ateityje.

Šiuolaikinių ekologijos problemų sprendimui nemaža įtakos turi chemijos inžinerija, kurianti mažaatliekes technologijas, efektyvius gamybinių vandenų ir į atmosferą išmetamų dujų valymo metodus. Taigi chemijos inžinerijos išmanymas leidžia spręsti tokius uždavinius:

1. Parinkti optimalius veikiančių gamybų režimus, pasiekti didelį aparatų našumą, aukštą produkcijos kokybę, sėkmingai išspręsti ekologines problemas.
2. Projektuojant naujas gamybas, sukurti efektyvias, mažaatliekes technologijas ir parinkti racionaliausių tipų aparatus.
3. Naudojant naujausius technikos atradimus, šiuolaikinę skaičiavimo techniką, atlikti moksliškai pagrįstus pasirinktų aparatų skaičiavimus, taip pat sukurti iš principo naujus cheminės technologijos procesų ir aparatų skaičiavimo metodus.
4. Atliekant mokslinius tiriamuosius darbus, išnagrinėti visus pagrindinius proceso eigą sąlygojančius veiksnius, gauti apibendrintas procesų skaičiavimo priklausomybes, greitai įdiegti laboratorinių tyrimų rezultatus į gamybą.

Pagrindinių cheminės technologijos procesų klasifikacija

Visi cheminės technologijos procesai pagal jų greitį nusakančius dėsningumus gali būti skirstomi į tokias grupes:

1. Hidromechaniniai procesai, kurių greitis nusakomas hidromechanikos dėsniais. Prie šių procesų priskiriamas dujų suslėgimas, dujų ir skysčių transportavimas, skystų ir dujinių nevienalyčių sistemų perskyrimas ir kt.

2. Šilumos mainų procesai, kurių greitis nusakomas šilumos pernašos dėsniais. Paprastai šilumos mainų procesų greičiui įtakos turi ir hidrodinaminės sąlygos šilumos mainų aparatuose. Prie šių procesų priskiriamas skysčių ir dujų šildymas bei aušinimas, skysčių garinimas, garų kondensacija.

3. Masės mainų procesai, kurių greitis nusakomas masės pernašos iš vienos fazės į kitą per jas skiriantį paviršių dėsniais. Paprastai masės mainų procesų pernašos greičiui įtakos turi hidrodinaminės sąlygos masės mainų aparatuose, taip pat šilumos perdavimo sąveikaujančioms fazėms ir aušinimo greitis. Prie šių procesų priskiriama absorbcija, adsorbcija, ekstrakcija, distiliacija, rektifikacija ir džiovinimas.

4. Cheminiai procesai, kurių greitis nusakomas cheminės kinetikos dėsniais. Dažnai cheminių procesų greitis labai priklauso nuo masės ir šilumos pernašos sistemoje greičio, t. y. nuo hidrodinaminių sąlygų cheminiame aparate.

5. Mechaniniai procesai, kurie apibūdinami kietųjų kūnų fizikos dėsniais. Prie jų priskiriamas kietų medžiagų smulkinimas, klasifikavimas, maišymas ir transportavimas.

Šie procesai sudaro daugelio chemijos, maisto produktų, vaistų gamybos technologijų pagrindą, todėl vadinami pagrindiniais (arba tipiniais) cheminės technologijos procesais.

Pirmoms keturioms procesų grupėms bendra yra tai, kad jų eiga susijusi su substancijos – judėjimo kiekio (impulso), energijos arba masės pernaša.

Cheminiai ir biocheminiai procesai nagrinėjami kituose kursuose.

Atsižvelgiant į tai, ar proceso parametrai (srauto greitis, temperatūra, slėgis ir t. t.) laikui bėgant keičiasi ar ne, procesai skirstomi į nuostoviuosius (stacionarius) ir nenuostoviuosius (nestacionarius). Jeigu procesą nusakančių parametrų visumą pažymėsime U, tai nuostoviųjų procesų metu $\partial U/\partial \tau = 0$, t. y. šie parametrai gali kisti erdvėje, bet tame pačiame taške visą laiką išlieka pastovūs. Kai procesai nenuostovūs, $\partial U/\partial \tau \neq 0$, t. y. procesą nusakantys parametrai kinta ne tik erdvėje, bet ir laikui bėgant. Procesas būna nenuostovus pradedant, stabdant arba nenutrūkstamajam procesui pereinant į naują režimą. Kai kuriais atvejais nenuostovusis proceso režimas efektyvesnis už nuostovųjį.

Pagal darbo organizavimą cheminės technologijos procesai skirstomi į periodinius (nutrūkstamus), nuolatinius (nenutrūkstamus) ir sudėtinius.

Visos periodinio proceso stadijos vyksta tame pačiame aparato taške ir procesą nusakantys parametrai (temperatūra, slėgis, koncentracija ir kt.) kinta jo metu. Vykdant šiuos procesus, tam tikrais laiko momentais į aparatą pakraunamos žaliavos, o jas apdorojus iškraunamas produktas. Visi periodiniai procesai yra nenuostovūs.

Nuolatiniams procesams būdinga tai, kad skirtinguose aparato (arba aparatų) taškuose tuo pačiu metu vyksta visos proceso stadijos, t. y. nenutrūksta-

mas žaliavų tiekimas į aparatą ir gatavos produkcijos iškrovimas vyksta visą laiką. Kiekviename aparato taške parametrų vertės proceso metu nekinta.

Sudėtinis procesas – tai lyg ir nuolatinis procesas, kurio atskiros stadijos vykdomos periodiškai, arba lyg ir periodinis procesas, kurio atskiros stadijos vykdomos nuolat.

Periodinius procesus tikslinga naudoti, kai gamyba yra nedidelio našumo ir gaminių asortimentas dažnai keičiasi. Esant didelio našumo gamybai, periodinius procesus tikslinga keisti nuolatiniais, nes tada aparatai našiau dirba, pagerėja produktų kokybė, labiau mechanizuojamas ir automatizuojamas procesas.

Dauguma cheminės technologijos procesų yra sudaryti iš kelių nuosekliai vykstančių stadijų. Dažnai viena iš stadijų vyksta gerokai lėčiau už kitas ir riboja viso proceso greitį. Ribojančiosios stadijos nustatymas leidžia supaprastinti proceso analizę ir aprašymą, padeda jį suintensyvinti. Pastaraisiais dešimtmečiais sukurta ir išbandyta nemažai procesų intensyvinimo metodų; jie bus aptarti nagrinėjant konkrečius tipinius procesus.

Pagal paplitimą technologiniai procesai skirstomi į bendruosius, naudojamus daugelyje gamybos šakų (pvz., maišymas, šildymas ir kt.), ir specialiuosius, būdingus tik vienai arba kelioms gamyboms. Pirmuosius nagrinėja chemijos inžinerija, o antruosius – specialiosios technologijos.

Cheminės technologijos procesų teoriniai pagrindai

Kiekviena mokslinė disciplina remiasi tam tikra teorija, taiko bendrą metodologiją ir logiškai nuoseklų medžiagos išdėstymą.

Chemijos inžinerijos teorinį pagrindą sudaro tokie gamtos dėsniai:

1. Masės, energijos ir impulso tvermės dėsniai. Pagal juos užrašomi procesų balansai (pvz., medžiagų ir energijos arba šilumos), kurių sudarymas yra svarbi cheminės technologijos procesų analizės ir skaičiavimų dalis.

2. Termodinaminės pusiausvyros dėsniai. Jie nurodo, kokiomis sąlygomis pasibaigia substancijos pernašos procesai. Sistemos būsena, kai vyksta grįžtamieji substancijos pernašos procesai, vadinama pusiausvyra. Pusiausvyra nusakoma Henrio, Raulio ir kitais dėsniais. Nustačius pusiausvyros sąlygas galima spręsti labai svarbius cheminės technologijos procesų analizės ir skaičiavimų uždavinius – nustatyti pernašos procesų kryptį ir sklidimo ribas, apskaičiuoti proceso varos jėgą.

3. Masės, energijos ir impulso pernašos dėsniai nusako bet kurios iš šių substancijų srauto tankio priklausomybę nuo proceso varos jėgos bei procesą apibūdinančio parametro gradiento. Varos jėga, pernešant masę, yra tankio arba koncentracijos pokytis, pernešant energiją, – entalpijos pokytis, o pernešant impulsą, – skysčio tūrio vieneto judėjimo kiekio ($w \cdot \rho$) pokytis.

Šie dėsniai sudaro hidromechaninių, šilumos ir masės mainų procesų teorinį pagrindą. Nagrinėjant cheminės technologijos procesus prie šių dėsnių reikia prijungti ir cheminės kinetikos dėsnius.

Kurso metodu vadinama tikrovės praktinio ar teorinio įsisavinimo priemonių visuma. Cheminės technologijos kurso metodologijos pagrindas yra fizikinis ir matematinis modeliavimas. Modeliavimas suprantamas kaip aparatuose vykstančių procesų tyrimas, analizuojant modelius, ir pačių modelių kūrimas. Modeliavimas remiasi originalo ir jo modelio fizikiniu arba matematiniu panašumu. Fizikinis modelis – tai tam tikrą skaičių kartų sumažintas arba padidintas originalas. Fizikinio modeliavimo atveju modelyje ir originale vykstančių procesų fizikinė esmė ta pati. Modeliuojant reikia atlikti tuos pačius matavimus, kuriuos atliktume tirdami originalą. Matematinio modeliavimo atveju tiriama slėgio, temperatūros ir kt. parametrų įtaka procesui, sprendžiant procesą aprašančių lygčių sistemą, papildytą pradinėmis ir ribinėmis sąlygomis. Matematiniam modeliavimui, priešingai negu fizikiniam, naudojami teoriniai arba idealizuoti modeliai.

Dauguma cheminės technologijos procesų vyksta judant arba maišantis dujų arba skysčio srautams dideliuose sudėtingos konfigūracijos aparatuose. Tai suteikia srautams sudėtingą hidrodinaminę struktūrą, srautai juda sudėtinga trajektorija, o atskiros srauto dalelės aparatuose būna nevienodai ilgai. Todėl sprendžiant šilumos ir masės mainų ir cheminės kinetikos uždavinius reikia žinoti srautų greičio laukus, kurių neįmanoma nustatyti sprendžiant pagrindines hidrodinamikos lygtis. Realus greičių pasiskirstymas aprašomas idealios srautų struktūros modeliais, turinčiais įvairius idealizavimo laipsnius. Neįvertinus srautų struktūros aparatuose, negalima modeliuoti procesų, modeliavimo ir skaičiavimo rezultatai gali būti klaidingi. Todėl į procesą aprašančių pagrindinių lygčių sistemą turi būti įtrauktos aparatuose judančių srautų hidrodinaminę struktūrą aprašančios lygtys.

Šioje dalyje išdėstyti cheminės technologijos pagrindų principai. Nagrinėjant hidromechaninius, šilumos ir masės mainų procesus, jie bus panaudoti tik įvertinus tų procesų ypatumus.

Skaičiuodamas procesus ir aparatus, inžinierius technologas paprastai turi spręsti tokius uždavinius:

1. Esant žinomam perdirbamų žaliavų kiekiui, apskaičiuoti gaunamą produkto kiekį;
2. Apskaičiuoti procesui vykdyti reikalingą energijos kiekį;
3. Nustatyti sistemos pusiausvyros sąlygas;
4. Nustatyti optimalias aparatų darbo sąlygas;
5. Apskaičiuoti optimaliomis sąlygomis dirbančių aparatų pagrindinius parametrus.

Šie uždaviniai sprendžiami remiantis tvermės, dinaminės pusiausvyros ir pernašos dėsniais.

1 DALIS

TVERMĖS DĖSNIAI

Tvermės dėsniui paaiškinti vartojamos elementariojo tūrio ir jį nuo visos likusios sistemos skiriančio paviršiaus sąvokos. Elementariuoju tūriu laikomas labai mažas (artėjantis prie nulio) sistemos (pvz., skysčio) tūris, tačiau daug kartų didesnis už molekulės (mikrodalelės) tūrį. Šis elementarusis tūris kartais vadinamas kontroliniu tūriu. Būtina sąlyga, kad elementarusis tūris turėtų visos sistemos savybes ir jame vyktų visai sistemai būdingi procesai. Elementariojo tūrio paviršius yra vadinamas elementariuoju arba kontroliniu paviršiumi. Veikiamas išorinių jėgų sistemos elementarusis tūris gali keistis substancija su visa sistema. Kontroliniam tūriui išsamiai apibūdinti reikia parinkti koordinačių sistemą, kurios atžvilgiu jis juda arba būna rimties būsenos.

1.1. Masės tvermės dėsnis

Masės tvermės dėsnis rimties būsenos sistemai teigia: sistemoje masė gali keistis, bet bendras jos kiekis lieka pastovus. Jeigu sistema susideda iš k komponentų ir vienos fazės Φ, kai nevyksta cheminės reakcijos, pagal masės tvermės dėsnį visų komponentų masių suma lygi visos sistemos masei, t. y.

$$M_1 + M_2 + ... + M_k = M \text{ arba } \sum_{i=1}^{k} M_i = M . \qquad (1.1)$$

Jeigu sistemoje yra m fazių Φ, kurias sudaro vienas komponentas, tai pagal masės tvermės dėsnį visos sistemos masė lygi fazių masių sumai, t. y.

$$M_{\Phi 1} + M_{\Phi 2} + ... + M_{\Phi m} = M \text{ arba } \sum_{i=1}^{m} M_{\Phi i} = M . \qquad (1.2)$$

Iš šios masės tvermės dėsnio išraiškos matyti, kad vienos fazės kiekiui mažėjant, didėja kitos fazės kiekis arba atvirkščiai, bet visų fazių masių suma lieka pastovi. Remiantis tik ką nagrinėtais ribiniais atvejais, galima užrašyti kiekvieno komponento ir kiekvienos fazės balanso lygtis. Paprastai visos medžiagos cheminės technologijos procesų metu juda sudarydamos srautą. Srau-

tas – tai dalelių visumos judėjimas iš vieno erdvės taško į kitą, veikiant išorinėms jėgoms. Toks srautas vadinamas konvekciniu. Srautas, judantis per skerspjūvio, statmeno srauto judėjimo krypčiai, ploto vienetą, vadinamas srauto tankiu. Srauto tankis q – tai vektorius, kurio kryptis sutampa su srauto kryptimi; jo matavimo vienetas – kiekio vienetas/(m^2·s).

Bet kuriai sistemai apibūdinti pakanka trijų srautų: masės (arba komponento), šilumos (arba energijos) ir impulso.

Kai balanso lygtys rašomos daliai aparato arba mažai erdvės sričiai (pvz., rašant diferencialines lygtis), reikia vertinti ne tik konvekcinius, bet ir molekulinius srautus, susidarančius vykstant difuzijai, kuri atsiranda dėl netolygaus koncentracijos pasiskirstymo judančiame sraute. Masės, energijos ir impulso tvermės dėsniai nagrinėjami kartu, todėl šių substancijų balansai turi būti sudaromi vienodai.

Medžiagų balansas. Cheminės technologijos procesuose dalyvaujančių medžiagų balansas sudaromas:

1) pagal bendrą procese dalyvaujančių medžiagų kiekį (bendras balansas); 2) pagal vieną iš komponentų (dalinis balansas); 3) pagal atskirus cheminius elementus, pvz., anglį, deguonį ir kitus.

Inžineriniuose cheminės technologijos procesų skaičiavimuose dažniausiai naudojami bendro medžiagų kiekio ir atskirų komponentų balansai (rašoma tiek balanso lygčių, kiek medžiagoje yra komponentų).

Balanso lygtys rašomos aparato daliai, visam aparatui, aparatų kompleksui, technologinei linijai, visai gamyklai ir t. t. Chemijos inžinerijoje dažniausiai naudojami pirmieji trys balansai. Pagal medžiagų balansų lygtis nustatoma: proceso išeiga procentais, lyginant su teoriškai numatomu produkto kiekiu, ir per laiko vienetą gautas produkto kiekis, kai žinomas perdirbamos žaliavos kiekis. Pagal masės tvermės dėsnį

$$\sum G_{\check{z}} = \sum G_P , \qquad (1.3)$$

t. y. perdirbtų žaliavų kiekių $G_{\check{z}}$ suma yra lygi gautų produktų (tarp jų ir atliekų) kiekių G_p sumai. Kai technologinių procesų metu susidaro medžiagų nuostoliai G_n, balanso lygtis užrašoma taip:

$$\sum G_{\check{z}} = \sum G_P + \sum G_n . \qquad (1.4)$$

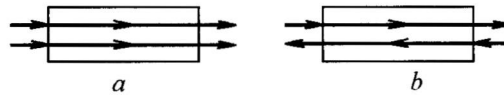
Nestacionariems procesams medžiagų balansas turi šiek tiek kitokią išraišką, kadangi iš nagrinėjamojo tūrio ištekantys arba į jį įtekantys srautai gali būti skirtingi:

$$\sum G_{\dot{i}} - \sum G_{i\check{s}} = G_{sn} ; \qquad (1.5)$$

čia $\Sigma G_{\dot{i}}$ – įtekėjimas; $\Sigma G_{i\check{s}}$ – ištekėjimas; G_{sn} – sankaupos.

Stacionariems procesams (1.5) lygties dešinioji pusė lygi nuliui, todėl, neatsižvelgiant į masės nuostolius, (1.5) lygtis tampa (1.3) lygtimi.

Medžiagų ir šilumos balansai makrotūriuose, pvz., visame aparate, sąveikaujant dviem fazėms (pvz., šilumos ir masės mainų procesų metu), priklauso nuo jų judėjimo krypties vienas kito atžvilgiu. 1.1 pav. parodyti dažniausiai cheminės technologijos procesuose paplitę srautų (fazių) judėjimai: pasrovinis (1.1 pav., *a*) ir priešsrovinis (1.1 pav., *b*). Vykstant šilumos arba masės mainų procesams tarp dviejų judančių srautų, kai pradinės jų temperatūros arba komponentų koncentracijos vienodos, ištekančių srautų parametrai pasrovinio ir priešsrovinio tekėjimo atvejais gerokai skiriasi.



1.1 pav. Srautų judėjimas aparatuose: *a* – pasrovinis, *b* – priešsrovinis

Kaip pavyzdį panagrinėkime stacionarią amoniako sugertį (absorbciją) iš oro ir amoniako dujų mišinio, maišantis dujoms su vandeniu visame aparato aukštyje (1.2 pav.). Amoniako kiekis, iš dujų mišinio perėjęs į vandenį, apskaičiuojamas pagal (1.6) lygtį:

$$M = M_l = G \cdot (y_į - y_{iš}) = L \cdot (x_{iš} - x_į); \qquad (1.6)$$

čia G ir L – inertinių dujų ir vandens sąnaudos, kg/s; $y_į$, $y_{iš}$, $x_į$ ir $x_{iš}$ – amoniako koncentracija dujose ir skystyje, jų srautams įtekant į aparatą ir iš jo ištekant, $kg_{amoniako}/kg_{in.dujų}$.

Ryšiui tarp amoniako koncentracijų nustatyti parašomas virš skerspjūvio *I-I* esančios kolonos dalies medžiagų balansas (1.2 pav., *a*):

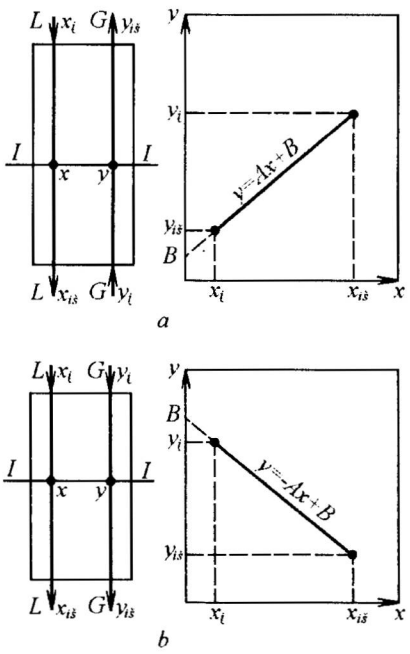
$$L \cdot x_į + G \cdot y = L \cdot x + G \cdot y_{iš} \quad arba$$

$$y = (L/G) \cdot x + \left[y_{iš} - (L/G) \cdot x_į \right]. \qquad (1.7)$$

Kadangi $L/G = const$, o antrasis (1.7) lygties dešiniosios pusės narys taip pat yra pastovus dydis, gauname:

$$y = A \cdot x + B; \qquad (1.8)$$

čia $A = L/G$ – tiesės posvyrio kampo tangentas; B – ordinatės atkarpa, kurią atkerta tiesė.



1.2 pav. Absorbcijos proceso darbo linijos:
a – esant priešsroviniam tekėjimui, *b* – esant pasroviniam tekėjimui

(1.8) lygtis aprašo dujų ir skysčių momentinių koncentracijų tarpusavio priklausomybę ir vadinama darbo linijos lygtimi. Pagal ją, esant bet kuriai x vertei, galima apskaičiuoti y vertę darbo sąlygomis.

Pasrovinio srautų judėjimo darbo linijos lygtis gaunama taip pat kaip ir priešsrovinio:

$$y = -A \cdot x + B \,. \qquad (1.9)$$

(1.9) lygtis nuo (1.8) lygties skiriasi tik ženklu prieš koeficientą A. 1.2 paveiksle pavaizduotos darbo linijos ((1.8) ir (1.9) lygtys), kurios, susipažinus su pusiausvyros dėsningumais (antroje dalyje), bus panaudojamos masės pernašos proceso varos jėgai nustatyti.

1.2. Energijos tvermės dėsnis

Remiantis pirmuoju termodinamikos dėsniu, galima suformuluoti energijos tvermės dėsnį: nuo aplinkos izoliuotos sistemos vidinė energija U yra pastovi, t. y. sistemai suteiktas energijos kiekis yra lygus iš jos išėjusiam energi-

jos kiekiui. Tačiau vidinės energijos pokytis dU yra lygus šilumos δQ ir atliekamo darbo δA skirtumui:

$$dU = \delta Q - \delta A. \qquad (1.10)$$

(1.10) lygtyje šilumos kiekis δQ ir atliekamas darbas δA apibūdina ne sistemą, o jos sąveikos su aplinka darbą, todėl jie nėra pilnieji diferencialai. Izoliuota sistema, perėjusi iš vienos energinės būsenos į kitą, apibūdinama nauja vidinės energijos verte, nes ji kinta nurodytu dydžiu nepriklausomai nuo perėjimo kelio.

Energijos balansas. Analizuojant ir skaičiuojant cheminės technologijos procesus, dažnai reikia nustatyti jiems atlikti reikalingą energijos (šilumos) kiekį. Šilumos kiekis, reikalingas cheminės technologijos procesui atlikti, apskaičiuojamas pagal šilumos balanso lygtį, kuri yra atskiras energijos balanso atvejis. Rašomos ne tik cheminiuose reaktoriuose, bet ir šilumos mainų ir masės mainų aparatuose vykstančių procesų šilumos balanso lygtys.

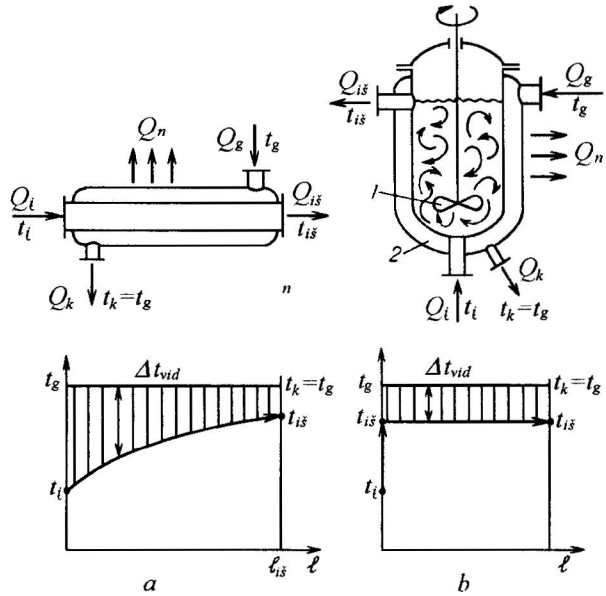
Šilumos balansas užrašomas taip:

$$\Sigma Q_i + \Sigma Q_p = \Sigma Q_{pr} + \Sigma Q_n ; \qquad (1.11)$$

čia ΣQ_i – žaliavų srautų įnešamų šilumos kiekių suma; ΣQ_p – fizikinių ir cheminių pasikeitimų metu išsiskyrusių (sunaudotų) šilumos kiekių suma; ΣQ_{pr} – proceso produktų srautų išneštų šilumos kiekių suma; ΣQ_n – šilumos nuostolių į aplinką suma.

1.3 paveiksle pavaizduotas skysčio šildymas idealaus išstūmimo ir idealaus sumaišymo aparatuose (žr. 4 dalį). Idealaus išstūmimo aparatuose skysčio temperatūra pagal aparato ilgį ℓ nuosekliai didėja nuo t_i iki $t_{iš}$, kadangi per aparatą tekantys skysčio tūriai vienas kitą išstumia tarpusavyje nesimaišydami. Idealaus sumaišymo aparatuose įtekantis skystis akimirksniu susimaišo su aparate esančiu skysčiu, todėl skysčio pradinė temperatūra t_i tokiame aparate momentaliai tampa lygi $t_{iš}$.

Vidutinis temperatūrų skirtumas Δt_{vid} (vidutinė šildymo proceso varos jėga), esant toms pačioms į aparatą įtekančių srautų (šildančiojo garo ir šildomojo skysčio) temperatūroms, idealaus išstūmimo aparate didesnė negu idealaus sumaišymo aparate, o šildomajam skysčiui perduodamas šilumos kiekis idealaus išstūmimo aparate yra didesnis negu idealaus sumaišymo aparate, t. y. $Q_{i,iš} > Q_{i,sm}$.



1.3 pav. Skysčio temperatūros kitimas šildant: garu *(a)* idealaus išstūmimo šilumokaityje „vamzdis vamzdyje" ir *(b)* idealaus sumaišymo aparate su maišykle ir apvalkalu; t_g – garo temperatūra, °C, t_k – kondensato temperatūra, °C

Šilumos balansas abiem atvejais vienodas, nors į balanso lygtį įeinančių dydžių vertės idealaus išstūmimo ir idealaus sumaišymo aparatams yra skirtingos. Todėl, sudarant šilumos balanso lygtį, reikia pasirinkti srauto struktūros hidrodinaminį modelį (žr. 5 dalį). Tokia prielaida sukelia skaičiavimo rezultatų paklaidą, nes srautai realiuose aparatuose skiriasi nuo srautų idealiuose modeliuose. Todėl nagrinėjamiems aparatams šilumos balanso lygtis

$$Q_i + Q_g = Q_{iš} + Q_k + Q_n; \qquad (1.12)$$

čia Q_i – šildomojo skysčio į aparatą įneštas šilumos kiekis; Q_g – šildančiojo garo į aparatą įneštas šilumos kiekis; $Q_{iš}$ – pašildyto skysčio iš aparato išneštas šilumos kiekis; Q_k – kondensato iš aparato išneštas šilumos kiekis; Q_n – šilumos nuostoliai į aplinką.

Pagal šilumos balanso lygtis taip pat galima apskaičiuoti procesui reikalingą šilumnešio arba aušalo kiekį, aparato šilumos mainų paviršių, procese dalyvaujančiam skysčiui arba dujoms transportuoti ir dujoms suslėgti reikalingas potencinės bei kinetinės energijos sąnaudas.

1.3. Impulso tvermės dėsnis

Impulso (judėjimo kiekio) tvermės dėsnis yra bendra pirmojo termodinamikos dėsnio išraiška kontroliniam tūriui. Impulsas lygus nagrinėjamo tūrio masės ir jo judėjimo greičio vektoriaus $\vec{w}$ sandaugai, todėl impulsas $m \cdot \vec{w}$ taip pat yra vektorius. Impulso tvermės dėsnis gali būti pateikiamas tiek vektorine, tiek skaliarine trijų lygčių, orientuotų pagal koordinačių ašis x, y, z, forma.

Judėjimo kiekio (impulso) balansas bus nagrinėjamas trečiojoje dalyje, išvedant pagrindines srauto judėjimo lygtis, smulkiau substancijos – masės, energijos ir impulso balansai – aptariant konkrečius šilumos ir masės mainų procesus.

2 dalis

PUSIAUSVYROS DĖSNINGUMAI

Detaliai termodinaminės pusiausvyros dėsningumai nagrinėjami fizikinės chemijos ir termodinamikos kursuose. Todėl šiame skyriuje bus nagrinėjamas tų dėsnių taikymas sprendžiant inžinerinius uždavinius – nustatant cheminės technologijos procesų kryptį ir varos jėgą.

Paprastai cheminės technologijos procesai vyksta sąveikaujant fazėms. Kontaktas tarp fazių gali būti tiesioginis (daugumos masės mainų procesų metu) arba per jas skiriančią sienelę (daugiausia šilumos mainų procesų).

Cheminio technologinio proceso pagrindinis uždavinys – kryptingai keisti procese dalyvaujančių medžiagų savybes (agregatinę būseną, temperatūrą, slėgį ir kt.). Todėl sistema yra veikiama tiekiant į ją arba iš jos paimant šilumą, taip pat veikiant išoriniais gravitacinių arba išcentrinių jėgų laukais ir pan. Dėl tokio poveikio pernešama masė, energija ir impulsas. Ribinė sistemos būsena yra paslanki pusiausvyra, kuri nesukelia procese dalyvaujančių medžiagų savybių kitimo erdvėje ir laike. Todėl pusiausvira vadinama tokia būsena, kuriai esant substancija – masė, energija ir impulsas – nepernešama.

2.1. Termodinaminės pusiausvyros sąlygos

Šiluminės pusiausvyros sąlygos nustatomos matuojant sąveikaujančių fazių temperatūrą (žr. 1.3 pav.). Mechaninė pusiausvyra (pernešant impulsą) nusakoma besiliečiančiose fazėse išmatuotų slėgių lygybe. Sunkiau nustatyti masės pernašos pusiausvyrą. Todėl šioje dalyje daugiausia dėmesio bus skiriama masės pernašos pusiausvyrai.

Uždaroje sistemoje, susidedančioje iš dviejų arba daugiau fazių, masės perėjimas iš vienos fazės į kitą vyksta savaime, kol nustatytomis sąlygomis (esant pastoviai temperatūrai ir slėgiui) tarp fazių nusistovi paslanki pusiausvyra. Jai būdinga tai, kad per laiko vienetą iš pirmosios fazės į antrąją pereina toks pat masės kiekis, kaip ir iš antrosios į pirmąją, t. y. nėra vyraujančios perėjimo iš fazės į fazę krypties. Sistema pusiausvira gali būti labai ilgai joje nevykstant jokių kokybinių ir kiekybinių pokyčių. Taigi izoliuotos sistemos

pusiausvyra nusakoma tik vidinėmis sąlygomis. Todėl parametrų gradientai ir nuo jų priklausantys srautai turi būti lygūs nuliui:

$$dT = 0, \tag{2.1}$$

$$dp = 0, \tag{2.2}$$

$$d\mu_i = 0; \tag{2.3}$$

čia T – temperatūra; p – slėgis; μ_i – i-ojo komponento cheminis potencialas.

Visi savaiminiai procesai vyksta pusiausvyros pasiekimo kryptimi. Kuo sistema toliau nuo pusiausvyros, tuo didesnis substancijos pernešimo iš fazės į fazę greitis, nes yra didesnė pernešimo proceso varos jėga.

Masei pernešti būtina, kad sistemoje nenusistovėtų pusiausvyra. Todėl į sistemą turi būti tiekiama medžiaga arba energija. Praktiškai atvirose sistemose šiai sąlygai įvykti sudaromas fazių judėjimas viena kitos atžvilgiu pagal pasrovinę, priešsrovinę arba kitokią srautų tekėjimo schemą.

Iš antrojo termodinamikos dėsnio išplaukia, kad savaime vykstančiuose procesuose sistemos entropija S didėja ir tampa maksimali sistemai pasiekus pusiausvyrą, t. y. pusiausvyros sąlygomis:

$$dS = 0. \tag{2.4}$$

(2.1), (2.2), (2.3) ir (2.4) lygybės nusako sistemos pusiausvyrą. Cheminis potencialas μ_i (2.3) lygtyje yra sistemos vidinės energijos U padidėjimas, į sistemą prie esamo medžiagos kiekio pridedant be galo mažą i-ojo komponento molių skaičių, kai sistemos tūris V, entropija S ir kitų komponentų molių skaičius n_i yra pastovus ($n_i = 1, 2, 3, \ldots$).

Bendruoju atveju cheminis potencialas gali būti nusakomas kaip sistemos bet kurio termodinaminio potencialo padidėjimas, esant pastovioms įvairių parametrų: Gibso energijos G (kai temperatūra T, slėgis p ir molių skaičius n_i yra pastovus), entalpijos H (kai entropija S, slėgis p ir molių skaičius n_i yra pastovūs), vertėms. Tai galima užrašyti lygtimi:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{S,V,n_j} = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{p,T,n_i} = \left(\frac{\partial H}{\partial n_i}\right)_{S,p,n_i}. \tag{2.5}$$

Cheminis potencialas priklauso ne tik nuo tiriamojo komponento koncentracijos, bet ir nuo kitų sistemos komponentų cheminės kilmės bei jų koncentracijos. Idealių dujų mišinio cheminis potencialas μ_i priklauso tik nuo tiriamojo komponento koncentracijos ir temperatūros:

$$\mu_i = \mu_i^0 + R \cdot T \cdot ln\left(p_i / p_i^0\right); \tag{2.6}$$

čia μ_i^0 – cheminio potencialo vertė standartinėms sąlygoms (kai p_0 = 0,1 MPa); p_i – mišinio i-ojo komponento parcialinis slėgis; p_i^0 – mišinio i-ojo komponento parcialinis slėgis standartinėmis sąlygomis.

Cheminis potencialas apibūdina tiriamojo komponento gebėjimą pasišalinti iš tiriamosios fazės (išgaruojant, kristalinantis ir pan.). Sistemoje, susidedančioje iš dviejų ar daugiau fazių, tiriamasis komponentas savaime gali pereiti tik iš fazės, kurioje jo cheminis potencialas didesnis, į fazę, kurioje tas potencialas mažesnis. Pusiausvyros sąlygomis cheminis komponento potencialas vienodas abiejose fazėse.

Bendruoju atveju cheminis potencialas gali būti išreikštas tokiomis lygtimis:

$$\mu_i = \mu_i^0 + R \cdot T \cdot \ln a_i, \tag{2.7}$$

$$a_i = x_i \cdot \gamma_i; \tag{2.8}$$

čia a_i – mišinio i-ojo komponento aktyvumas; x_i – i-ojo komponento molinė dalis; γ_i – i-ojo komponento aktyvumo koeficientas.

Aktyvumo koeficientas γ_i yra komponento nukrypimo nuo idealios būklės kiekybinis matas. Kai $\gamma_i > 1$, nukrypimas nuo idealios būklės vadinamas teigiamu, o kai $\gamma_i < 1$, – neigiamu. Atskirų sistemų $\gamma_i \leq 1$. Tada $a_i = x_i$ ir (2.7) lygtis užrašoma taip:

$$\mu_i = \mu_i^0 + R \cdot T \cdot \ln x_i. \tag{2.9}$$

Idealių sistemų cheminis potencialas gali būti apskaičiuotas pagal komponento lakumą f_i:

$$\mu_i = \mu_i^0 + R \cdot T \cdot \ln\left(f_i / f_i^0\right); \tag{2.10}$$

čia f_i^0 – i-ojo komponento lakumas standartinėmis sąlygomis.

a_i ir f_i vertės yra pateiktos žinynuose.

Vykstant technologiniams procesams, darbo terpė (garai, dujos, skystis) nėra pusiausvira. Sistemos nepusiausvirai būsenai aprašyti vartojami papildomi nepusiausviri arba disipatyvūs parametrai. Tai gali būti atitinkamų disipatyviųjų srautų termodinaminių parametrų (temperatūros, slėgio, cheminio potencialo ir tankio) gradientai.

2.2. Fazių taisyklė

Tiriamosios fazės buvimas sistemoje arba fazių pusiausvyra galima tik esant tam tikroms sąlygoms. Jas pakeitus, sistemos pusiausvyra suardoma, fazės persislenka arba medžiaga pereina iš vienos fazės į kitą. Galima tiriamosios fazės pusiausvyra su kitomis fazėmis nusakoma fazių taisykle arba Gibbso fazių pusiausvyros dėsniu:

$$c + \Phi = k + n; \qquad (2.11)$$

čia c – laisvės laipsnių skaičius – minimalus skaičius parametrų (pvz., slėgis, temperatūra, koncentracija), kuriuos galima keisti nepriklausomai vieną nuo kito, nepažeidžiant tiriamosios sistemos pusiausvyros; Φ – sistemos fazių skaičius; k – nepriklausomų komponentų skaičius sistemoje; n – tiriamosios sistemos pusiausvyrą veikiančių išorinių parametrų skaičius.

Masės mainų procesams turi įtakos du išoriniai parametrai ($n = 2$) – temperatūra ir slėgis. Tuomet (2.11) lygtis užrašoma taip:

$$c + \Phi = k + 2 \quad \text{arba} \quad c = k - \Phi + 2.$$

Fazių taisyklė leidžia nustatyti, kiek parametrų keičiant sistemos pusiausvyra nepažeidžiama.

Pvz., vieno komponento pusiausviros sistemos skystis–garai laisvės laipsnių skaičius $c = 1 - 2 + 2 = 1$, t. y. šiuo atveju laisvai pasirinktas gali būti tik vienas parametras, pvz., slėgis arba temperatūra. Taigi pusiausvyros sąlygomis vienkomponentei sistemai būdingas vienareikšmis ryšys tarp temperatūros ir slėgio. Kaip pavyzdį galima paminėti priklausomybę tarp sočiųjų vandens garų slėgio ir jų temperatūros.

Vieno komponento ir trijų fazių pusiausviros sistemos (kieta medžiaga–skystis–garai) laisvės laipsnių skaičius lygus nuliui $c = 1 - 3 + 2 = 0$. Pvz., sistema vanduo–ledas–vandens garai yra pusiausvira esant 610,6 Pa slėgiui ir 0,0076 °C temperatūrai.

Dviejų komponentų pusiausviros sistemos skystis–garai laisvės laipsnių skaičius $c = 2 - 2 + 2 = 2$.

Šiuo atveju vienas iš kintamųjų dydžių (pvz., slėgis) pasirenkamas ir gaunama vienavertė priklausomybė tarp temperatūros ir koncentracijos. Jei temperatūra pastovi, gaunama priklausomybė tarp koncentracijos ir slėgio. Ryšys tarp temperatūros ir koncentracijos ir tarp slėgio ir koncentracijos sudaromas plokštuminėje diagramoje. Tokios diagramos vadinamos fazinėmis diagramomis.

Fazių taisyklė nurodo fazių bendro egzistavimo galimybę, bet nenurodo medžiagos pernašos tarp fazių kiekybinių priklausomybių.

2.3. Pusiausvyros lygtys ir linijos

Skaičiuojant masės mainų procesus tarp fazių pasiskirsčiusios medžiagos faktinės arba darbinės koncentracijos būna nurodytos. Proceso krypčiai ir greičiui nustatyti būtina žinoti pusiausviras koncentracijas darbo sąlygomis arba pasiskirsčiusios medžiagos pusiausviros koncentracijos y^* vienoje fazėje priklausomybę nuo koncentracijos kitoje fazėje x, t. y.

$$y^* = f(x). \tag{2.12}$$

Dažniausiai šios funkcijos analitinė išraiška užrašoma lygtimi:

$$y^* = m \cdot x^n; \tag{2.13}$$

čia m ir n – eksperimentiškai nustatomi dydžiai.

Tiriant sistemas skystis–dujos, nustatyta, kad koeficiento m vertė priklauso nuo sistemos fizikinių cheminių savybių, taip pat nuo temperatūros ir slėgio bei nuo tarp fazių pasiskirsčiusios medžiagos koncentracijos. Todėl koordinačių sistemos y-x diagramoje pusiausvyros linijos, apskaičiuotos pagal (2.12) arba (2.13) lygtis, gali būti kreivės (2.1 pav.).

Idealių sistemų, pvz., tirpalų, pusiausvyros linijos yra žinomos. Idealiam tirpalui, jei jo temperatūra aukštesnė už krizinę dujų tirpumo temperatūrą, taikomas Henrio dėsnis, pagal kurį ištirpusių dujų parcialinis slėgis yra proporcingas jo molinei daliai tirpale:

$$p^* = E \cdot x; \tag{2.14}$$

čia p^* – sugertų dujų parcialinis slėgis virš pusiausviro tirpalo, kai tirpalo koncentracija x; E – Henrio konstanta.

Pagal Daltono dėsnį komponento parcialinis slėgis p dujų mišinyje tiesiai proporcingas dujų mišinio suminiam slėgiui P ir komponento molinei koncentracijai mišinyje:

$$p = P \cdot y. \tag{2.15}$$

Tada į (2.15) lygtį įrašę (2.14) lygtį ir pritaikę ją pusiausvyros sąlygoms, gauname:

$$y^* = E \cdot x/P = m \cdot x. \tag{2.16}$$

Koeficiento m vertė (2.16) lygtyje priklauso nuo bendro slėgio ir temperatūros. Kylant temperatūrai, m didėja, o dujų tirpumas dėl to mažėja; didėjant bendram slėgiui, m mažėja, o dujų tirpumas dėl to didėja.

Esant pastoviam slėgiui ir temperatūrai, priklausomybė tarp pusiausviros koncentracijos y^* ir darbinės koncentracijos x yra per koordinačių pradžią einanti tiesė, kurios polinkio kampo tangentas lygus m.

Henrio dėsnis galioja idealiems tirpalams. Realiems tirpalams jį galima taikyti tik tuomet, kai jie praskiesti. Labai tirpių dujų tirpumas, esant didelėms jų koncentracijoms tirpale, būna mažesnis už apskaičiuotą pagal Henrio dėsnį. Jei sistemai negalioja Henrio dėsnis, m vertė yra kintamas dydis ir dujų tirpumo kreivė (pusiausvyros kreivė) nubrėžiama pagal eksperimentinius duomenis.

Jeigu idealių tirpalų temperatūra žemesnė už dujų kritinę, t. y. vyksta dujų kondensacija, tuomet sistemai galioja Raulio dėsnis, kurio analitinė išraiška gali būti gauta iš (2.6) ir (2.9) lygčių, esant vienodiems cheminiams potencialams:

$$p_i = p_i^0 \cdot x_i . \tag{2.17}$$

Iš (2.17) lygties išplaukia, kad i-ojo komponento parcialinis garų slėgis virš tirpalo yra lygus gryno komponento (to komponento sočiųjų garų, esant nustatytai temperatūrai) slėgio p_i^0 ir jo molinės dalies skystyje x_i sandaugai. Dvikomponenčio mišinio A–B atveju (2.15) ir (2.17) lygtys išreiškia ryšį tarp darbinių ir pusiausvirų koncentracijų:

$$y_A^* = p_A^0 \cdot x_A / p , \tag{2.18}$$

$$p = p_A + p_B = p_A^0 \cdot x_A + p_B^0 \cdot (1 - x_A) . \tag{2.19}$$

Pertvarkę abi lygtis, gauname: $y_A^* = \dfrac{p_A^0 \cdot x_A}{p_A^0 \cdot x_A + p_B^0 \cdot (1 - x_A)}$.

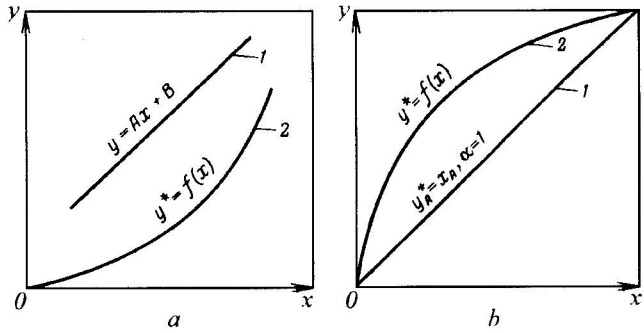
Šios lygybės dešiniąją pusę padauginę ir padaliję iš p_B^0 ir pažymėję $\alpha = p_A^0 / p_B^0$, gauname:

$$y_A^* = \frac{\alpha \cdot x_A}{\alpha \cdot x_A + 1 - x_A} = \frac{\alpha \cdot x_A}{1 + x_A \cdot (\alpha - 1)} . \tag{2.20}$$

Koeficientas α yra savitasis komponento A lakumas komponente B. (2.20) lygtis yra kreivės lygtis. Primename, kad savitasis lakumas mažai priklauso nuo temperatūros, tačiau mažėja didėjant slėgiui sistemoje ir dėl to pablogėja mišinio perskyrimo sąlygos.

Jeigu nagrinėjamai sistemai medžiagos fazių tarpusavio pusiausvirojo pasiskirstymo dėsnis netaikytinas, tai priklausomybę tarp komponentų koncentracijų galima rasti žinynuose ir fazinėje diagramoje nubrėžti atitinkamą

kreivę. Dažniausiai naudojamasi eksperimentiniais duomenimis, kadangi pasiskirstymo dėsniai nustatyti idealioms sistemoms.



2.1 pav. Procesų, aprašomų (2.13) lygtimi (*a*) ir (2.20) lygtimi (*b*), fazinės *y*-*x* diagramos: *1* – darbo linija, *2* – pusiausvyros linija

Sudėtingesni sąlyginės pusiausvyros analizės atvejai, pvz., daugiakomponentėse sistemose, kuriose dalyvauja kietoji fazė, bus nagrinėjami vėlesniuose skyriuose.

Žinant pusiausviras ir darbo koncentracijas, galima nustatyti, iš kokios fazės į kokią pereina tarp fazių pasiskirstanti medžiaga.

Tarkim, kad darbo ir pusiausviros koncentracijų tarpusavio santykis atitinka 2.1 pav. *a* dalį. Jeigu $y > y^*$ $(x < x^*)$, medžiaga pereina iš pirmosios fazės į antrąją. Jeigu $y < y^*$ $(x > x^*)$, medžiagos perėjimo kryptis keičiasi – iš antrosios fazės ji pereina į pirmąją. Taigi, tarp fazių pasiskirstanti medžiaga fazių kontakto taške juda į tą fazę, kurioje darbo koncentracija mažesnė už pusiausvirąją.

Žinant darbo ir pusiausviros koncentracijų skirtumą, galima nustatyti masės pernašos proceso varos jėgą, kuri naudojama skaičiuojant masės perdavimo proceso greitį. Proceso varos jėgos skaičiavimo metodus aptarsime masės mainų procesų dalyje.

3 dalis

IMPULSO, ENERGIJOS IR MASĖS PERNAŠOS DĖSNIAI

Cheminės technologijos procesuose substancijos pernaša dažniausiai vyksta skystyje, dujose arba garuose, jiems judant arba maišantis. Pernašos greitis daugiausia priklauso nuo hidrodinaminių sąlygų aparatuose, kuriuose vyksta tekėjimas. Hidrodinaminės sąlygos daugeliu atvejų nusakomos ir jas galima kryptingai reguliuoti, norint aparatuose sudaryti optimalius režimus, kadangi jie remiasi gana gerai ištirtais hidrodinamikos dėsniais. Todėl, prieš pritaikant judėjimo kiekio, energijos ir masės pernašos dėsnius, reikia susipažinti su hidrodinamikos sąvokomis ir apibrėžimais.

3.1. Bendrosios hidraulikos žinios

Hidraulika yra mokslas, nagrinėjantis įvairių skysčių pusiausvyrą ir judėjimą. Skirtingai nuo hidromechanikos, hidraulika yra techniškasis mokslas, kuris, spręsdamas įvairius praktinius uždavinius, daro daug prielaidų, supaprastinimų ir pasiūlymų, pvz., daugeliu atveju apsiriboja tik vienmačio judėjimo nagrinėjimu. Todėl hidrauliniai skaičiavimai dažnai būna tik apytikriai. Jie tiesiogiai remiasi laboratorijose arba su veikiančiais aparatais atliktų eksperimentų duomenimis. Todėl hidraulikoje pateikiama daug eksperimentinių priklausomybių. Sprendžiant hidraulikos uždavinius, operuojama vienais ar kitais vidutiniais dydžiais, stengiantis pateikti tik pagrindines tiriamojo reiškinio charakteristikas. Pvz., naudojamas vidutinis skysčio dalelės judėjimo greitis viename ar kitame srauto skerspjūvyje. Imant vidutines vertes, gaunami patikimi techninių uždavinių sprendiniai.

Hidraulikoje paprastai taikomi hidromechaniniai metodai, todėl ji vadinama taikomąja arba techniškąja hidrodinamika. Pastaraisiais dešimtmečiais pastebimas hidromechanikos ir hidraulikos suartėjimas. Hidromechanika vis daugiau remiasi eksperimentu, o hidraulikai keliami griežtesni reikalavimai. Nustatyti ribą tarp šių mokslų (teisingiau – tarp skysčių mechanikos tyrimo metodų) sunku. Daugelyje chemijos inžinerijos vadovėlių „terminas“ hidraulika jungia taikomąją ir teorinę hidromechanikas.

Hidraulika skirstoma į hidrostatiką, nagrinėjančią skysčių pusiausvyrą sraute, ir hidrodinamiką, nagrinėjančią skysčių judėjimo dėsnius. Skysčius, dujas ir garus įprasta vadinti skysčiais, nes kai srauto greičiai gerokai mažesni už garso greitį, skysčių judėjimo dėsningumai tinka dujų ir garų judėjimui. Todėl toliau skysčiais bus vadinamos medžiagos, gebančios tekėti. Hidraulikos dėsniams išvesti vartojama idealaus skysčio sąvoka. Tai absoliučiai nespūdus, neklampus skystis, kurio tankis, kintant temperatūrai ir slėgiui, išlieka pastovus. Realūs skysčiai būna lašeliniai ir tamprūs (dujos ir garai). Lašelinius skysčius galima laikyti nespūdžiais, jų tūrinio plėtimosi koeficientas labai mažas.

3.1.1. Realų skystį veikiančios jėgos

Judantį skystį arba skysčio srautą veikia jėgos, kurios skirstomos į tūrio ir paviršiaus jėgas.

Tūrio jėgos veikia kiekvieną tiriamojo skysčio tūrio elementą ir yra proporcingos šiame tūrio elemente esančiai masei. Prie jų priskiriamos sunkio, inercijos ir išcentrinės jėgos. Sunkio jėgos G, veikiančios tiriamąjį tūrį V, intensyvumo charakteristika yra skysčio savitasis svoris γ, N/m^3:

$$\gamma = \lim_{V \to 0}(G/V) = \lim_{V \to 0}(g \cdot m/V) = \rho \cdot g\,. \qquad (3.1)$$

Skysčio masės ir tūrio santykis vadinamas jo vidutiniu tankiu ρ, kg/m^3:

$$\rho = \lim_{V \to 0}(m/V) = \gamma/g\,. \qquad (3.2)$$

Lašelinių skysčių tankis ir savitasis svoris nustatomi eksperimentiškai ir mažai priklauso nuo jų temperatūros ir slėgio.

Dujų tankis, esant palyginti nedideliems slėgiams, gali būti apskaičiuotas pagal idealiųjų dujų lygtį:

$$\rho = p \cdot v/(R \cdot T) \text{ arba } \rho = \frac{M}{22{,}4} \cdot \frac{p \cdot 273}{p_0 \cdot T}\,; \qquad (3.3)$$

čia p – absoliutusis slėgis, Pa; p_0 – absoliutusis slėgis normaliomis sąlygomis, Pa; v – savitasis tūris (1 kg masės tūris), m^3/kg; T – absoliučioji temperatūra, K; R – universalioji dujų būsenos konstanta, J/(kg·K); M – molekulinė masė, kg/kmol.

Pasikeitus slėgiui ir temperatūrai, dujų tankis perskaičiuojamas, įvertinant susispaudimo koeficientą β:

$$\rho = p \cdot v/(\beta \cdot R \cdot T),\ \beta = f(p, T). \qquad (3.4)$$

Susispaudimo koeficientas β parodo, kokia dalimi sumažėja dujų tūris padidinus slėgį vienu slėgio vienetu:

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p};$$

čia V – dujų tūris, m^3; ΔV – dujų tūrio pokytis, padidinus slėgį dydžiu Δp, m^3.

Skysčio savitasis tūris v yra jo masės vieneto tūris, t. y. atvirkščias dydis tankiui. Jis apskaičiuojamas taip:

$$v = V/m . \qquad (3.5)$$

Šildomi visi realieji skysčiai plečiasi. Tik vanduo, šildomas nuo 0 iki 4 °C, traukiasi, o aukštesnėje temperatūroje taip pat plečiasi. Šis plėtimasis apibūdinamas tūrio šiluminiu plėtimosi koeficientu α_p, kuris parodo, kuria dalimi padidėja skysčio tūris pakėlus jo temperatūrą vienu laipsniu:

$$\alpha_p = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}; \qquad (3.6)$$

čia V – skysčio tūris, m^3; ΔV – skysčio tūrio pokytis, pakėlus temperatūrą dydžiu Δt.

Lašelinių skysčių tūrio šiluminio plėtimosi koeficientas α_p yra daug mažesnis negu dujų, pvz., mineralinės alyvos $\alpha_p = (7–8)\cdot 10^{-4}$, o idealiųjų dujų $\alpha_p = 1/T$.

Skysčio tankis ρ_t bet kurioje temperatūroje t apskaičiuojamas taip:

$$\rho_t = \rho_{20} - \alpha_p \cdot (t - 20); \qquad (3.7)$$

čia ρ_{20} – skysčio tankis, esant standartinei temperatūrai (20 °C), kg/m^3; α_p – skysčio šiluminio plėtimosi koeficientas.

3.1 lentelė. Vandens šiluminio plėtimosi koeficiento α_p vertės

t	α_p	t	α_p	t	α_p
5	$0{,}15\cdot 10^{-4}$	50	$4{,}6\cdot 10^{-4}$	100	$7{,}5\cdot 10^{-4}$
10	$0{,}9\cdot 10^{-4}$	60	$5{,}2\cdot 10^{-4}$	120	$8{,}5\cdot 10^{-4}$
20	$2{,}1\cdot 10^{-4}$	70	$5{,}8\cdot 10^{-4}$	140	$9{,}7\cdot 10^{-4}$
30	$3{,}0\cdot 10^{-4}$	80	$6{,}4\cdot 10^{-4}$	160	$11{,}0\cdot 10^{-4}$
40	$3{,}9\cdot 10^{-4}$	90	$7{,}0\cdot 10^{-4}$		

Paviršiaus jėgos veikia tiriamojo skysčio tūrio paviršių, atskiriantį tiriamąjį tūrį nuo aplinkos. Prie jų priskiriamos slėgio ir vidinės trinties (kartais

vadinamos klampa) jėgos. Kai skystis yra rimties būsenos, jį veikia sunkio ir slėgio jėgos, o realiųjų skysčių judėjimo dėsningumas nusakomas ne tik sunkio, slėgio, bet ir vidinės trinties jėgų veikimu.

Paviršiaus jėgų intensyvumo charakteristika yra įtempis τ, atsirandantis tūrį V ribojančiame paviršiuje S. Tai paviršiaus jėgų ir ploto S santykio riba, kai plotas artėja prie nulio:

$$\vec{\tau} = \lim_{\Delta S \to 0} \left(F_S / \Delta S \right). \tag{3.8}$$

Normalinė (statmena paviršiui S) įtempių dedamoji atsiranda dėl paviršiaus jėgos F_S dedamosios, veikiančios kokiame nors taške statmenai paviršiui:

$$\vec{\tau}_T = \lim_{\Delta S \to 0} \left(F_{S,T} / \Delta S \right). \tag{3.9}$$

Skysčio slėgio jėga į indo, kuriame yra skystis, dugną arba sieneles, taip pat į skystyje panardinto kūno paviršiaus ploto vienetą yra hidrostatinis slėgis. Rimties būsenos skystyje išskiriamas plotas ΔS. Statmenai šį plotą veikia skysčio stulpo slėgio jėga ΔP. Santykis $\Delta P/\Delta S$ yra vidutinis hidrostatinis slėgis, o šio santykio riba, kai $\Delta S \to 0$, vadinama hidrostatiniu slėgiu tiriamajame taške arba tiesiog hidrostatiniu slėgiu.

Jėga ΔP bet kuriame ploto ΔS taške yra statmena šiam plotui. Jeigu jėga ΔP į plotą būtų nukreipta tam tikru kampu, tai šią jėgą galima būtų suskaidyti į dvi dedamąsias: vieną statmeną ΔS, o antrą – ΔS liestinės kryptimi. Pastaroji priverstų skysčio elementą judėti, o kartu išjudintų skystį iš rimties būsenos, kadangi tai prieštarautų pradinei rimties sąlygai. Slėgis bet kuriame rimties būsenos skysčio taške visomis kryptimis yra vienodas, priešingu atveju užimamo tūrio viduje skystis judėtų.

Hidromechanikoje įtempiai laikomi teigiamais, jeigu jie nukreipti iš tūrio išilgai paviršiaus S normalės. Normaliniai įtempiai, slegiantys tiriamąjį tūrį, t. y. nukreipti į tūrio vidų, yra neigiami. Toliau bus nagrinėjami tik slėgio įtempiai, kadangi realūs skysčiai tempimo įtempiams neatsparūs.

Hidrostatinis slėgis yra skaliarinis dydis ir priklauso nuo vektorinio normalinių įtempių dydžio $\vec{n}$. Ši priklausomybė išreiškiama lygtimi

$$\vec{\tau}_n = -P \cdot \vec{n}. \tag{3.10}$$

Hidrostatinis slėgis SI sistemoje matuojamas Pa (N/m^2) arba nesisteminiais vienetais: kgf/cm^2, atmosferomis, skysčio stulpo aukščiu.

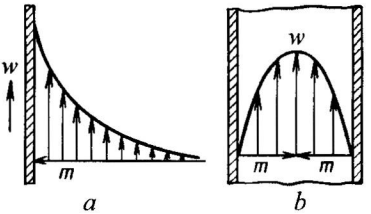
Prie paviršiaus jėgų priskiriamos vidinės trinties jėgos F_S, nukreiptos paviršiaus liestinės kryptimi. Tangentiniai įtempiai, atsirandantys veikiant vidi-

nės trinties jėgoms, vadinami vidinės trinties jėgos įtempiais arba šlyties įtempiais:

$$\vec{\tau}_T = \lim_{\Delta S \to 0} \left(F_S / \Delta S \right). \qquad (3.11)$$

Tangentiniai įtempiai atsiranda dėl judėjimo kiekio (impulso) pernašos judančiuose skysčiuose, esant netolygiam greičių pasiskirstymui. Greičiai netolygiai pasiskirsto tiek skysčiams tekant kanaluose, tiek skysčiuose judant kietiesiems kūnams. Netolygus greičių pasiskirstymas aiškinamas dviejų gretimų skysčio sluoksnių tarpusavio sąveika arba skysčio dalelių sąveika su kietųjų kūnų (kanalų arba judančių kūnų) paviršiumi. Gretimų sluoksnių tarpusavio sąveika pasireiškia chaotišku molekulių judėjimu bendrame sluoksnių tūryje ir arti viena kitos esančių gretimų sluoksnių molekulių tarpusavio trauka.

Eksperimentiškai nustatyta, kad dėl skysčio dalelių sąveikos su kanalo sienelių ar skysčiuose judančių kūnų paviršiumi prie paviršiaus prilipusių dalelių greitis tampa lygus paviršiaus judėjimo greičiui. Prie kanalų sienelių susidaro nejudančių dalelių sluoksnis, kurio judėjimo greitis lygus nuliui, o skystyje judančio kūno paviršiuje esančio skysčio sluoksnio judėjimo greitis lygus paties kūno judėjimo greičiui.



3.1 pav. Skysčio greičio pasiskirstymas:
a – prie judančios plokštelės paviršiaus, *b* – kanalo skerspjūvyje

Judantis kietasis kūnas, pvz., plokštelė (3.1 pav., *a*), padeda artimiausiems skysčio sluoksniams greitėti, perduodamas jiems impulsą, o šie analogiškai veikia gretimus sluoksnius.

Judant skysčiui kanaluose nuo sienelės nutolę greitesni skysčio sluoksniai lėtėja, atiduodami judėjimo kiekį arčiau sienelių esantiems lėtesniems skysčio sluoksniams. Taigi tekančiame skystyje, kuriame greičių laukas netolygus, impulsas perduodamas nuo greičiau tekančių skysčio sluoksnių lėčiau tekantiems skysčio sluoksniams. Pernašos priežastis – tiesioginė, chaotiška molekulių pernaša iš vieno sluoksnio į kitą, kuri būdinga dujoms, o iš dalies ir lašeliniams skysčiams. Lašeliniuose skysčiuose impulso pernašos priežastis

gali būti tiesioginė gretimų skysčio sluoksnių molekulių sąveika dėl tankiai supakuotų molekulių didelės tarpusavio sąveikos jėgos.

Impulso perdavimas iš sluoksnio į sluoksnį ekvivalentiškas trinties tarp sluoksnių atsiradimui, nes pagal antrąjį Niutono dėsnį jėga yra proporcinga impulso laiko išvestinei. Ši trinties jėga trukdo gretimiems skysčio sluoksniams kartu judėti. Taigi trinties jėgos įtempis lygus srauto per ribinį paviršių tarp tekančio skysčio sluoksnių impulso tankiui.

Eksperimentiškai įrodyta, kad daugelio skysčių tangentiniai trinties jėgos įtempiai τ tiriamame elementaraus paviršiaus, skiriančio du judančio skysčio sluoksnius, taške yra proporcingi greičio gradientui. Esant vienmačiam skysčio tekėjimui (3.1 pav.), vidinės trinties įtempiai apskaičiuojami pagal Niutono vidinės trinties dėsnio išraišką:

$$\tau = -\mu \cdot dw/dn ; \qquad (3.12)$$

čia μ – dinaminės klampos koeficientas, Pa·s.

Minuso ženklas aiškinamas tuo, kad normalės kryptis sutampa su greičio mažėjimo kryptimi. Impulso srauto tankio teigiama vertė atitinka neigiamą greičio gradiento vertę, t. y. srautas orientuotas normalės kryptimi, o gradientas – priešinga kryptimi.

Tuo atveju, kai normalė nukreipta greičio didėjimo kryptimi, (3.12) lygtyje minuso ženklas pasikeičia į pliuso ženklą.

Skysčiai, kurių vidinės trinties įtempiui galioja šis Niutono vidinės trinties dėsnis, vadinami niutoniniais skysčiais. Skysčiai, kuriems tekant vidinės trinties įtempiai neaprašomi (3.12) lygtimi, vadinami neniutoniniais skysčiais. Technologiniuose procesuose dažniausiai naudojami niutoniniai skysčiai, todėl juos daugiausia ir nagrinėsime.

Klampa nusako skysčio pasipriešinimą sluoksnių judėjimui ir yra viena iš pagrindinių fizikinių skysčio savybių. Kylant temperatūrai, skysčių klampa mažėja, nes intensyvėja molekulių judėjimas, sumažėja traukos jėgos ir padidėja atstumas tarp molekulių, taip pat mažėja lašelinių skysčių molekulių asociacija.

Dujų klampa didėja kylant temperatūrai ir slėgiui, kadangi padidėjęs šiluminio judėjimo greitis intensyvina dujų sluoksnių keitimąsi impulsu. (3.12) lygtis gali būti užrašyta ir taip:

$$\vec{q} = -\nu \cdot [d(\rho \cdot w)/dn] \cdot \vec{n} .$$

Ši lygtis išreiškia priklausomybę tarp impulso srauto tankio $\vec{q}$ ir skysčio tūrio vieneto impulso gradiento $m \cdot w/V$ ($m \cdot w/V = \rho \cdot w$). Lygtis tinka plokščiai lygiagrečiam srautui ir sąlygiškai nespūdžiai terpei.

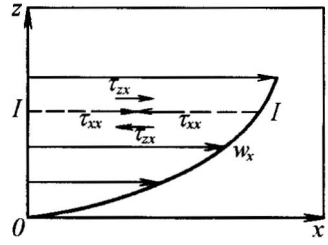
Proporcingumo koeficientas ν ($\nu = \mu/\rho$, m^2/s) vadinamas kinematine klampa. Taigi dinaminė (μ) ir kinematinė (ν) klampa apibūdina pasipriešinimą skysčio judėjimui, o kartu yra impulso pernašos judančiame skystyje intensyvumo matas.

Bendruoju atveju, kada skysčio srautas teka ne plokštumoje ir nėra lygiagretus su plokštuma, t. y. kada greičio vektorius turi dedamąsias w_x, w_y ir w_z, kurios yra visų trijų koordinačių funkcija, vidinės trinties įtempių išraiška yra sudėtingesnė ir skiriasi nuo (3.12) lygties.

Vidinės trinties įtempių projekcijos į x ašį, išreiškiamos tokia lygčių sistema:

$$\tau_{yx} = \mu \cdot (\partial w_x/\partial y + \partial w_y/\partial x);$$
$$\tau_{zx} = \mu \cdot (\partial w_z/\partial x + \partial w_x/\partial z); \quad (\tau_{xx})_T = 2 \cdot \mu \cdot \partial w_x/\partial x. \tag{3.13}$$

Trinties įtempiuose $[\tau_{yx}, \tau_{zx}, (\tau_{xx})_T]$ pirmasis indeksas rodo ašį, statmeną plokštumai, kurią veikia tiriamieji įtempiai, antrasis indeksas – ašį, į kurią įtempiai projektuojami. Pvz., τ_{zx} – įtempių, veikiančių plokštumoje *I-I*, statmenoje z ašiai, projekcija į x ašį (3.2 pav.).



3.2 pav. Vidinės trinties jėgų tangentinių ir normalinių įtempių projekcijos į x-z plokštumą

Taigi projekcijos τ_{yx} ir τ_{zx} yra tangentiniai įtempiai, veikiantys plokštumose, statmenose ašims y ir z. Projekcija $(\tau_{xx})_T$ yra vidinės trinties normaliniai įtempiai, veikiantys išilgai x ašies statmenai plokštumai yz. Indeksas T rodo, kad šie įtempiai priskiriami tik trinčiai, skirtingai nuo suminių normalinių įtempių, į kuriuos taip pat įeina hidrostatinio slėgio įtempiai.

Vidinės trinties projekcijos į y ašį išraiška:

$$\tau_{xy} = \mu \cdot (\partial w_y/\partial x + \partial w_x/\partial y);$$
$$\tau_{zy} = \mu \cdot (\partial w_z/\partial y + \partial w_y/\partial z); \quad (\tau_{yy})_T = 2 \cdot \mu \cdot \partial w_y/\partial y. \tag{3.13a}$$

Analogiškai vidinės trinties įtempių projekcijos į z ašį išraiška:

$$\tau_{xz} = \mu \cdot \left(\partial w_z / \partial x + \partial w_x / \partial z\right);$$
$$\tau_{yz} = \mu \cdot \left(\partial w_y / \partial z + \partial w_z / \partial y\right); \quad \left(\tau_{zz}\right)_T = 2 \cdot \mu \cdot \partial w_z / \partial z. \tag{3.13b}$$

Įtempių projekcijas į visas koordinačių ašis galima užrašyti tokia sistema, kuri išreiškia apibendrintą Niutono dėsnį trimačiam nespūdaus skysčio greičio pasiskirstymui:

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\partial w_i / \partial m_j + \partial w_j / \partial m_i\right); \quad \left(\tau_{ii}\right)_T = 2 \cdot \mu \cdot \partial w_i / \partial m_i;$$
$$j \neq i; \quad m_x = x; \quad m_y = y; \quad m_z = z. \tag{3.14}$$

Nors (3.14) lygčių sistema tiksliau aprašo vidinės trinties įtempius, analizuojant trinties jėgos įtaką cheminės technologijos procesams, naudojamasi paprastesne (3.12) lygtimi. Tai aiškinama tuo, kad svarbiausi tekėjimo atvejai (pvz., skysčio tekėjimo plona plėvele, susiliečiančia su kieta sienele) artimi lygiagrečiajam tekėjimui plokštumoje ir todėl pakankamai tiksliai aprašomi (3.12) lygtimi.

3.1.2. Pagrindinės srauto charakteristikos

Kaip buvo minėta anksčiau, lašelinių skysčių ir dujų savybės ir judėjimo dėsningumai yra panašūs, kai dujų srauto greitis mažesnis už garso greitį. Todėl šiame skyriuje nagrinėjamos tik lašelinių skysčių srauto charakteristikos.

Skysčio debitas ir judėjimo greitis. Skysčiai vamzdynais, kanalais arba aparatais juda tik pasikeitus juose slėgiui. Slėgio pokytis atsiranda esant skysčio lygių skirtumui arba sudaromas specialiomis mašinomis-siurbliais. Skysčio tūris, pratekėjęs per srauto skerspjūvio plotą per laiko vienetą, vadinamas skysčio tūrio debitu $V_{s,h}$ (matuojamas m^3/s, m^3/h). Dėl vidinės trinties jėgos poveikio atskirų dalelių greitis tame pačiame srauto skerspjūvyje būna skirtingas. Srauto ašyje (centre) jis esti didžiausias, o prie kanalo sienelių mažiausias. Kadangi atskirų skysčio sluoksnių greitį ir jo pasiskirstymą visame srauto skerspjūvyje nustatyti gana sunku, tai, sprendžiant daugelį inžinerinių uždavinių, imamas vidutinis srauto greitis ir tariama, kad kiekviename skerspjūvio taške visi sluoksniai juda vienodu greičiu. Toks sąlyginis greitis w, kuris kartais vadinamas tūrio greičiu, apskaičiuojamas kaip tūrio debito V_s ir srauto skerspjūvio ploto F santykis:

$$w = V_s / F. \tag{3.15}$$

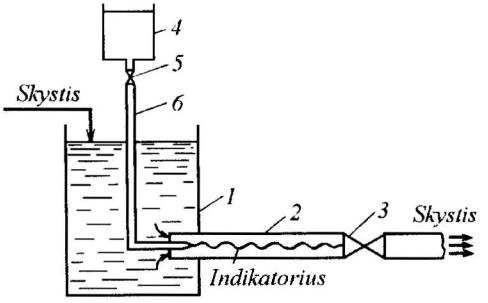
Be vidutinio tūrio greičio, naudojamas ir vidutinis masės greitis $m = w \cdot \rho$, $kg/(m^2 \cdot s)$, o vietoj tūrio debito – masės debitas (G_s, kg/s arba G_h, kg/h). Šiuos debitus galima apskaičiuoti pagal vieną iš debito lygčių:

$$G_h = 3600 \cdot G_s = V_h \cdot \rho = 3600 \cdot V_s \cdot \rho . \qquad (3.15a)$$

(3.15) ir (3.15a) lygtys vadinamos debito lygtimis ir dažnai naudojamos skaičiuojant vamzdynus ir cheminius aparatus.

Judėjimo rūšys. Procesai pagal parametrų kitimą skirstomi į nuostoviuosius (stacionarius) ir nenuostoviuosius (nestacionarius). Nuostoviojo skysčio judėjimo greitis nepriklauso nuo laiko ir tekėjimas bet kuriame srauto taške lieka nepakitęs, t. y. $\partial w/\partial \tau = 0$, ir greitis yra tik erdvinės koordinačių sistemos funkcija $w = f(x,y,z)$. Nenuostoviojo judėjimo atveju $\partial w/\partial \tau \neq 0$ ir $w = f(\tau,x,y,z)$, o jo pavyzdys gali būti skysčio tekėjimas iš indo pro angą jo dugne arba sienelėje: kai į indą skystis netiekiamas, skysčio lygiui inde visą laiką mažėjant, skysčio ištekėjimo greitis mažėja.

Realiojo skysčio judėjimo režimai. Devynioliktojo amžiaus pabaigoje mokslininkai pastebėjo, kad egzistuoja du skirtingi skysčio judėjimai. Išsamiausiai tai ištyrė O. Reinoldsas. Stendas, kuriame buvo atlikti skysčio tekėjimo pobūdžio tyrimai, pavaizduotas 3.3 paveiksle. Stendą sudaro rezervuaras *1*, kuriame, norint sudaryti nuostovųjį srautą, palaikomas pastovus skysčio aukštis, ir prie jo prijungtas horizontalus stiklinis vamzdis *2*. Bandymo pradžioje pradarius sklendę *3*, iš indo pradeda tekėti skystis. Atidarius sklendę *5*, iš indo *4* kapiliariniu vamzdeliu *6* į vamzdžio *2* ašį tiekiamas dažytas skystis (indikatorius), kurio tankis ir judėjimo greitis toks pat kaip tiriamojo skysčio. Esant mažiems tiriamojo skysčio greičiams, plona dažyto skysčio srovelė teka srauto centre nesimaišydama su tiriamuoju skysčiu, t. y. tiriamojo ir dažytojo skysčių dalelės juda tiesiai ir lygiagrečiomis trajektorijomis. Toks nusistovėjęs tekėjimas buvo pavadintas sluoksniniu, arba laminariniu (lot. *lamina* – sluoksnis), tekėjimu.



3.3 pav. Tekėjimo pobūdžio nustatymo stendas: *1* – rezervuaras, *2* – stiklinis vamzdis, *3* – dažų kapiliarinis vamzdelis, *4* – indas su indikatoriumi, *5* – sklendė, *6* – kapiliarinis vamzdelis

Esant pakankamai dideliems skysčio greičiams, dažyto skysčio srovelė elgiasi kitaip. Pradžioje srovelė vamzdyje *2* tam tikrą atstumą teka nepasikeitusi, paskui ji įgauna bangos formą, svyruoja nuo vienos pusės į kitą ir pagaliau visiškai susimaišo su pagrindiniu tiriamuoju skysčiu. Tokį netvarkingą judėjimą srauto skerspjūvyje vykstant intensyviam maišymuisi O. Reinoldsas pavadino banguotuoju, o dabar jis vadinamas sūkuriniu arba turbulentiniu (lot. *turbulentus* – smarkus, netvarkingas).

Eksperimentiškai nustatyta, kad tekėjimo režimas priklauso ne tik nuo srauto judėjimo greičio w, bet ir nuo tiriamojo skysčio fizikinių savybių: klampos μ, tankio ρ ir srautą apibūdinančio geometrinio matmens – vamzdžio skersmens d. Perėjimas nuo laminarinio režimo į turbulentinį spartėja didėjant w, d, ρ ir mažėjant μ. Bedimensis kompleksas $w \cdot d \cdot \rho/\mu$, iš kurio vertės galima spręsti apie skysčio srauto judėjimą, buvo pavadintas Reinoldso skaičiumi (kriterijumi) ir žymimas *Re*:

$$Re = w \cdot d \cdot \rho/\mu .$$

Reinoldso kriterijaus vertė, kuriai esant laminarinis skysčio tekėjimas pereina į turbulentinį, vadinama kritine. Skysčiui judant tiesiu hidrauliškai glotniu vamzdžiu kritinis $Re_{kr} = 2300$. $Re < 2300$ atitinka laminarinį skysčio tekėjimą, $Re > 10000$ – turbulentinį. Kai $2300 < Re < 10000$, skysčio judėjimas nestabilus: gali būti ir laminarinis, ir turbulentinis. Ši *Re* kriterijaus sritis vadinama pereinamojo tekėjimo sritimi.

Pasikeitus kanalo sienelių šiurkštumui, srauto skerspjūviui (susiaurėjus arba praplatėjus), tekėjimo krypčiai (alkūnės, gyvatukai), kritinė Re_{kr} vertė gali sumažėti. Tai galima matyti sudėtingos konfigūracijos cheminiuose aparatuose. Tokiu atveju eksperimentiškai nustatoma Re_{kr} vertė. Tipinių aparatų Re_{kr} nurodoma žinynuose. Re_{kr} vertė taip pat mažėja neizoterminio srauto skerspjūvyje, kadangi atsiranda skysčio konvekcinės srovės, statmenos srauto judėjimo ašiai.

Skysčiui tekant sudėtingos konfigūracijos kanalais ir cheminiais aparatais, Reinoldso kriterijui apskaičiuoti vietoj skersmens d imamas hidraulinis spindulys r_h arba ekvivalentinis skersmuo d_{ekv}.

Hidrauliniu spinduliu r_h vadinamas srauto skerspjūvio ploto F santykis su drėkinamu kanalo (vamzdyno) perimetru Π ($r_h = F/\Pi$).

Skritulio skerspjūvio vamzdžių

$$r_h = \pi \cdot d^2/4 \cdot \pi \cdot d = d/4.$$

Hidrauliniu spinduliu išreikštas skersmuo vadinamas ekvivalentiniu skersmeniu: $d = d_{ekv} = 4 \cdot r_h$. Tuomet

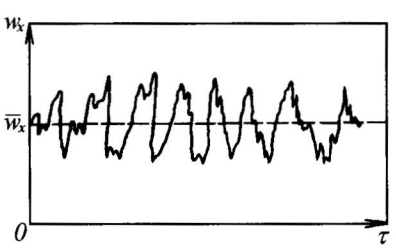
$$d_{ekv} = 4 \cdot F/\Pi \,. \qquad (3.16)$$

Turbulentinio srauto pagrindinės charakteristikos. Kasdieniniame gyvenime su turbulencijos pasireiškimais susiduriame mus supančiame pasaulyje, pvz., oro judėjimas atmosferoje ir vandens judėjimas hidrosferoje. Dėl turbulencijos vyksta keitimasis impulsu ir šiluma tarp vandens telkinių ir atmosferos (oro judėjimas ir bangų susidarymas, garavimas nuo vandenyno paviršiaus ir sausumos, vertikali šilumos, drėgmės, druskų, įvairių teršalų pernaša ir kt.). Kosmose vadinamoji plazminė turbulencija turi įtakos plazmos dalelių, turinčių krūvį, sąveikai.

Pramoniniai procesai labai dažnai vykdomi turbulentiškai tekant srautams, kadangi šiomis sąlygomis daugelis cheminės technologijos procesų labai suintensyvėja. Turbulentinio srauto struktūra nusakoma srauto judėjimo greičiu, skysčio fizikinėmis savybėmis, srautą ribojančių kanalų forma, jo dydžiu ir kt.

Atskiri turbulentinio srauto elementai – sūkuriai juda chaotiškai, nenuostoviai. Sūkuriu suprantama dalelių grupė, vienodu kampiniu greičiu besisukanti apie vieną momentinę ašį. Sūkurys pagal santykį su jį supančiu skysčiu panašus į kietą dalelę. Turbulentinio tekėjimo metu sūkuriai nuolat susidaro ir suyra. Jų prasiskverbimo gylis iki suirimo, t. y. turbulencijos elementų (sūkurių) nueitas kelias, priklauso nuo turbulencijos išsivystymo sraute laipsnio arba jos masto ir vadinamas turbulencijos mastu. Turbulencijos mastą dažniausiai lemia išorinės tekėjimo sąlygos (pvz., vamzdyno arba kanalo skersmuo). Turbulencija, neribojama sienelių įtakos, vadinama laisvąja (pvz., skysčio arba dujų čiurkšlių ištekėjimas į nejudantį skystį).

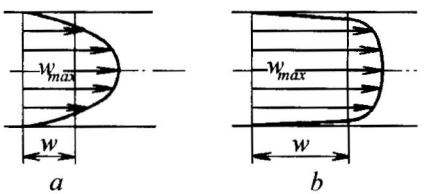
Sūkuriai pulsuoja apie vidutinę savo padėtį tekančiame skystyje; toks judėjimas vadinamas pulsaciniu. Lygiai taip kinta ir momentinis greitis tiriamajame srauto taške (3.4 pav.). Netvarkingas sūkurių judėjimas sukelia intensyvų skysčio judėjimą srauto skerspjūvyje. Pulsacija ir yra būdingiausias turbulencijos požymis.



3.4 pav. Vietiniai turbulentinio srauto greičiai:
w_x – tikrasis srauto greitis, $\overline{w}_x$ – vidutinė greičio vertė pagal pulsacijos trukmę

Kadangi sūkurio masė ir jo nueitas kelias daug didesnis už molekulės masę ir jos laisvąjį kelią, tai impulso, masės ir šilumos pernaša dėl chaotiško sūkurių judėjimo daug didesnė už molekulinę pernašą, atsirandančią dėl šiluminio molekulių judėjimo.

Turbulentinio tekėjimo atveju greičio pasiskirstymo skerspjūvyje kreivė (epiūra) (3.5 pav., *b*) skiriasi nuo laminariniam tekėjimui būdingos parabolės (3.5 pav., *a*). Minėtos kreivės viršūnė yra labiau suapvalinta.



3.5 pav. Skysčio tekėjimo greičio kitimas vamzdyje:
a – esant laminariniam tekėjimui, *b* – esant turbulentiniam tekėjimui

Vidutinio ir ašinio greičių santykis yra Reinoldso kriterijaus funkcija $w/w_{max} = f(Re)$. Kuo didesnis *Re*, tuo didesnis santykis w/w_{max}, t. y. tuo vidutinis srauto greitis artimesnis maksimaliam srauto greičiui. Dėl sudėtingo turbulentinio judėjimo pobūdžio teoriškai apskaičiuoti greičių santykį labai sunku. Todėl kreivė w/w_{max} išreiškia ne tikrojo greičio, o vidutinio pagal pulsacijos laiką momentinio judėjimo greičio pasiskirstymą. Griežtai vertinant, turbulentinis tekėjimas nėra nusistovėjęs tekėjimas, nes momentinis greitis kiekviename srauto taške laikui bėgant keičiasi. Naudojant vidutinį pagal pulsacijos laiką greitį, šį tekėjimą galima laikyti nusistovėjusiu. Todėl turbulentinis tekėjimas gali būti vadinamas kvazistacionariu.

Tiriamajame taške nurodytu laiko momentu (3.4 pav.) greitį galima apskaičiuoti taip:

$$\overline{w}_x = \int_0^{\tau} (w_x/\tau)\cdot d\tau .$$

Skirtumas tarp tikrojo ir vidutinio greičių $w_x - \overline{w}_x = \Delta w_x$ vadinamas momentiniu pulsaciniu greičiu.

Kadangi netvarkingas sūkurių judėjimas yra analogiškas šiluminiam dujų molekulių judėjimui, tai masės, energijos (šilumos) ir impulso pernašos procesai turbulentiniame sraute aprašomi taip pat kaip molekulinėje kinetinėje dujų teorijoje. Taigi pagal analogiją laisvam molekulių keliui vartojama susimaišymo kelio sąvoka: tai atstumas, kurį sūkurys nueina nesimaišydamas su supančiu skysčiu. Molekulinės pernašos metu perneštas judėjimo kiekis išreiškiamas Niutono vidinės trinties dėsniu ((3.12) lygtis). Tariant, kad turbulenti-

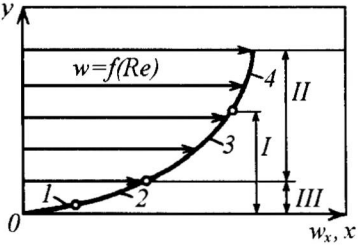
nės trinties įtempiai τ_T (arba jiems lygus sūkurių pernešamo impulso tankis) yra proporcingi greičio arba impulso gradientui, jie apskaičiuojami taip:

$$\tau_T = -\nu_T \cdot d(w \cdot \rho)/d\,n\,. \qquad (3.17)$$

Dydis ν_T vadinamas turbulentinės klampos koeficientu. Skirtingai nuo molekulinės klampos koeficiento ν, jis priklauso nuo visų turbulenciją apibūdinančių parametrų, tarp jų ir nuo vidutinio greičio.

Kadangi molekulių masė nepalyginamai mažesnė už sūkurių masę, sūkurių tarp gretimų skysčio sluoksnių pernešamas impulsas ir jų tarpusavio greitinimas arba stabdymas yra gerokai didesnis, o kartu žymiai didesni ir turbulentinės trinties sukeliami įtempiai. Dėl to srauto vidutinė turbulentinė klampa gerokai didesnė už molekulinę (niutoninę) klampą, t. y. $\nu_T >> \nu$.

Turbulentinį srautą sąlygiškai skirstome į branduolį ir pasienio sluoksnį, kuriame turbulentinis tekėjimas pasikeičia į laminarinį, nes judėjimo greitis skerspjūvyje sumažėja nuo maksimalaus srauto ašyje iki nulio prie sienelės. Greičio profilio grafike (3.6 pav. epiūroje) galima išskirti keletą skirtingo skysčio tekėjimo kanale sričių. Nagrinėjant tekėjimą vamzdžiu matyti, kad daugiausia greitis pasikeičia srityje *III*, kurios plotis sudaro 15 % vamzdžio spindulio. Tiesiogiai prie sienelės prisiglaudę sluoksniai *1* ir *2* pavaizduoti didesniu masteliu (3.6 pav.), jų storis iš tikrųjų sudaro labai nedidelę spindulio dalį – apie 1 % arba net ir mažiau. Nors sluoksnių storis nedidelis, jie esmingai veikia visą srautą, greitis daugiausia pasikeičia šiuose sluoksniuose. Taip keičiantis greičiui, keičiasi daugelio cheminės technologijos procesų eiga. Dideliu greičiu vykstanti makroskopinė substancijos pernaša turbulentinio srauto branduolyje (dėl intensyvaus dalelių maišymosi srauto skerspjūvyje) užleidžia vietą gana lėtai molekulinei pernašai pasienio sluoksniuose. 3.6 pav. pavaizduota epiūra, kai vamzdžio sienelė glotni; iš tikrųjų jos paviršius turi nelygumų, kurių aukštis lyginamas su vidinių sluoksnių *1* ir *2* storiu. Tai turi įtakos energijos sąnaudoms reikiamam srauto greičiui pasiekti.



3.6 pav. Turbulentinio srauto greičio epiūros skerspjūvio struktūros modelis:
1 – klampus pasluoksnis, *2* – pereinamasis (tarpinis) sluoksnis,
3 – visiškai turbulentinis sluoksnis, 4 – turbulentinis srauto branduolys;
I – pasienio sritis, *II* – visiškai turbulentinis tekėjimas, *III* – klampiojo tekėjimo sritis

Detaliau panagrinėsime 3.6 pav. pavaizduotas sritis.

1. Klampusis pasluoksnis. Jo vidutinio greičio kitimas išreiškiamas tiesine priklausomybe nuo molekulinės klampos, kaip ir laminariniame sraute. Šiame pasluoksnyje $\nu >> \nu_T$.

2. Pereinamasis (tarpinis) sluoksnis. Jame klampieji ir turbulentiniai įtempiai yra panašaus didumo, t. y. $\nu \approx \nu_T$, ir turbulencija staigiai išnyksta.

3. Visiškai turbulentinis sluoksnis. Jame tekėjimui turi įtakos ir sienelės efektas, tačiau turbulencija yra pasiekusi tokį laipsnį, kad klampiųjų įtempių galima nepaisyti, t. y. $\nu << \nu_T$ (kadangi vidutinio greičio kitimas šioje srityje aprašomas logaritmine priklausomybe, sritis dažnai vadinama logaritminiu sluoksniu).

4. Turbulentinis srauto branduolys. Jame srautas yra visiškai turbulentinis, o turbulencijos mastas nusakomas vamzdžio skersmeniu.

Šias keturias sritis galima sujungti taip: sritys *1* ir *2* sudaro klampųjį sluoksnį – klampiojo tekėjimo sritį (*III*), t. y. sritį, kurioje klampa turi didelę vertę susidarant trinčiai ir suteikiant energiją iš vidutinio judėjimo. Tokio tipo klampusis sluoksnis susidaro tik tada, kai sienelės šiurkštumo iškilumai, palyginti su šio sluoksnio storiu, yra maži. Praktiškai toks aprašymas teisingas tuo atveju, kai šiurkštumo iškilumai neprasiskverbia pro klampaus tekėjimo srities sluoksnį. Sritys *3* ir *4* sudaro visiškai turbulentinio tekėjimo sritį (*II*). Šioje srityje turbulencijos mastas nepriklauso nuo klampos.

Sritys *1*, *2* ir *3* sudaro pasienio sluoksnį (*I*), kuriame turbulentinis tekėjimas pereina į laminarinį.

Reikia pasakyti, kad nagrinėtas turbulentinio tekėjimo keturių sluoksnių modelis yra gerokai idealizuotas realusis tekėjimas. Iš tikrųjų ribos tarp sluoksnių nėra ryškios ir 3.6 pav. pavaizduoti sritis ribojantys taškai yra sąlyginiai.

Šioje dalyje buvo nagrinėjamos tik kai kurios turbulentinio tekėjimo charakteristikos, kurių labiausiai reikia išvedant ir analizuojant toliau pateiktas substancijos pernašos lygtis.

3.2. Pagrindinė substancijos pernašos lygtis

Judančio skysčio masėje išskiriamas tūris V, kurio paviršiaus plotas S. Tūrį veikia netolygios pernašos varos jėgos φ laukas. Sprendžiant daugelį hidrodinamikos šilumos ir masės mainų uždavinių, reikalingos diferencialines lygtys, aprašančios greičių, koncentracijų ir temperatūros pasiskirstymą tiek laike, tiek erdvėje.

Pernašos varos jėga φ yra savitoji masė, energija arba judėjimo kiekis, tenkantis tūrio vienetui. Jeigu pernešama masė, tai proceso varos jėga yra tankis ρ arba koncentracija C:

$$\varphi = \rho = \sum_{i=1}^{n} m_i / V \quad \text{arba} \quad \varphi = C = m_i / V ; \tag{3.18}$$

čia m_i – i-ojo komponento masė mišinyje; $[\rho]=[C]=\left[kg/m^3\right]$.

Kai pernešama šiluma, proceso varos jėga yra skysčio tūrio vieneto entalpija h:

$$\varphi = h = c_p \cdot t \cdot \rho \cdot V / V = c_p \cdot t \cdot \rho ; \tag{3.19}$$

čia c_p – aplinkos savitoji šiluma; $\left[c_p \cdot t \cdot \rho\right]=\left[J/m^3\right]$.

Hidrodinaminiuose procesuose pernašos potencialas yra skysčio tūrio vieneto judėjimo kiekis arba impulsas:

$$\vec{\varphi} = \vec{w} \cdot \rho \cdot V / V = \vec{w} \cdot \rho ; \tag{3.20}$$

čia $[\vec{w} \cdot \rho] = [kg/(m^2 \cdot s)]$.

Tiriamajame skysčio tūryje yra pernašos varos jėgos šaltinių, apibūdinamų savituoju tūriniu pritekėjimo tankiu γ, t. y. pritekėjimo į tūrio vienetą greičiu: energijos $[\gamma]=\left[J/(m^3 \cdot s)\right]$, masės $[\gamma]=\left[kg/(m^3 \cdot s)\right]$ arba impulso $[\gamma]=\left[kg/(m^2 \cdot s)\right]$.

Šilumos ir masės pernaša per nagrinėjamąjį paviršių S gali būti dvejopa:

1) molekulinė, t. y. pernaša, atsirandanti sistemai artėjant prie termodinaminės pusiausvyros, nuo kurios nukrypimas aiškinamas potencialo lauko netolygumu;

2) makroskopinė-konvekcinė, kuri atsiranda esant greičių laukui tūryje V. Pernešant judėjimo kiekį, prie šių dviejų pernašos būdų prisideda hidrostatinio slėgio lauko sukelta pernaša, o pernešant šilumą, – pernaša dėl šilumos spinduliuotės.

Substancijos srautas, atsirandantis sistemai artėjant prie termodinaminės pusiausvyros, nusakomas chaotišku aplinkos molekulių, pernešančių masę, energiją ir impulsą, o kartu artinančių potencialą prie vidutinės jo vertės, judėjimu tiriamajame tūryje. Molekulinė pernaša yra vyraujanti nejudamoje terpėje ar laminariniu būdu judančiuose srautuose. Ji aprašoma žinomais tiesiniais gradientų dėsniais.

Pirmasis Fiko dėsnis taikomas masės pernašai:

$$\vec{g}_{m,C} = -D \cdot grad(C) ; \tag{3.21}$$

čia D – molekulinės difuzijos koeficientas, m^2/s. $g_{m,C}$ – substancijos srauto tankis.

Furjė dėsnis **taikomas** energijos (šilumos) pernašai:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot grad(t); \qquad (3.22)$$

čia λ – šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K).

Įvertinus (3.19) lygtį, (3.22) lygtis gali būti užrašyta taip:

$$\vec{q}_{m,t} = -\lambda \cdot grad(c_p \cdot t \cdot \rho)/(c_p \cdot \rho) = -a \cdot grad(c_p \cdot t \cdot \rho); \qquad (3.23)$$

čia $a = \lambda/(c_p \cdot \rho)$ – temperatūrinis laidumo koeficientas, m^2/s.

Niutono vidinės trinties dėsnis taikomas impulso pernašai:

$$\vec{g}_{m,w} = -\mu \cdot grad(\vec{w}). \qquad (3.24)$$

Pasinaudojus (3.20) lygtimi, (3.24) lygtis užrašoma taip:

$$\vec{g}_{m,w} = -\mu \cdot grad(\rho \cdot \vec{w})/\rho = -\nu \cdot grad(\rho \cdot \vec{w}). \qquad (3.25)$$

Visi čia užrašyti dėsniai, išreiškiantys negrįžtamą masės, energijos bei impulso pernešimą, aprašomi analogiškomis lygtimis. Tai aiškinama pernašos procesų pagrindą sudarančių fizinių reiškinių sutapimu.

Šie dėsniai galioja ir dujoms, nes joms naudotini molekulinės pernašos koeficientai yra artimi $D \approx a \approx \lambda$. Tai liudija, kad difuzinė masės, energijos ir impulso pernaša yra chaotiško šiluminio molekulių judėjimo dujose pasekmė ir iš pirmo žvilgsnio šių procesų mechanizmas yra vienodas.

Lašelinių skysčių molekulinės pernašos koeficientai turi skirtingas vertes, todėl pernašos reiškinių analogija yra ribota.

Taigi masės $\vec{g}_{m,C}$, energijos $\vec{q}_{m,t}$ ir impulso $\vec{g}_{m,\vec{w}}$ molekulinė pernaša aprašoma identiškomis lygtimis, kurios gali būti apibendrintos tokia išraiška:

$$\vec{g}_m = -k \cdot grad(\varphi); \qquad (3.26)$$

čia k – proporcingumo koeficientas, kuris priklausomai nuo pernešamos substancijos gali būti prilygintas D, a, ν.

Vykstant konvekcinei pernašai, masė, energija ir impulsas yra pernešami makrodalelių, kurios juda greičiu $\vec{w}$, tūryje V. Masės, energijos arba impulso tankis $\vec{q}_k$ kiekvienoje paviršiaus dalelėje gali būti išreiškiamas lygtimi

$$\vec{q}_k = \vec{w} \cdot \Delta S \cdot \varphi/\Delta S = \vec{w} \cdot \varphi, \qquad (3.27)$$

čia ΔS – paviršiaus ploto dalis, statmena greičio vektoriui $\vec{w}$.

Vykstant kartu molekulinei ir konvekcinei masės arba energijos pernašai, bendras srauto tankis $\vec{q}$ susideda iš dviejų dėmenų:

$$\vec{q} = \vec{q}_k + \vec{q}_m . \tag{3.28}$$

Analizuojant šilumos pernašos procesą, prie dešiniosios (3.28) lygties pusės reikia pridėti dar vieną dydį q_l, kuris įvertina šiluminės spinduliuotės įtaką bendram šilumos pernešimui. Tūrį V ribojančiame paviršiuje S išskiriame paviršiaus elementą ΔS. Padauginę elemento skaitinę vertę iš vienetinio vektoriaus $\vec{n}$, gausime jo vektorinę formą. Elementarusis vektorius $\vec{n}$ turi būti nukreiptas pagal šio elementaraus plotelio ΔS normalę iš tūrio V ($\vec{n} \cdot dS = d\vec{S}$). Suminis masės, energijos arba judėjimo kiekio srautas, įtekantis į tūrį V, apskaičiuojamas taip:

$$M = -\oiint_S \vec{q} \cdot d\vec{S} + \iiint_V \gamma \cdot dV . \tag{3.29}$$

Minuso ženklas prieš šios lygties dešiniosios pusės pirmosios dalies integralą rodo, kad paviršiaus elemento $d\vec{S}$ vektoriaus kryptis priešinga įtekančių masės, energijos, judėjimo kiekio srautų tankių vektoriaus krypčiai. Suminis srautas bus lygus įtekančio ir ištekančio srautų tarpusavio skirtumui.

Suminis masės arba energijos srautas gali būti apskaičiuotas kaip savitojo tūrio, energijos arba masės (potencialo φ) suma laike pagal visą tūrį V:

$$M = \iiint_V \partial\varphi \cdot dV / \partial\tau .$$

Palyginę dviejų pastarųjų lygčių dešiniąsias puses, gauname:

$$-\oiint_S \vec{q} \cdot d\vec{S} + \iiint_V \gamma \cdot dV = \iiint_V \partial\varphi \cdot dV / \partial\tau . \tag{3.30}$$

Remiantis Ostrogradskio ir Gauso teorema, vektoriaus paviršiaus normalės dedamosios integralas lygus vektoriaus divergencijos* pagal tūrį integralui:

---

* *divergentia* (lot.) – išsiskyrimas. Srauto tankis taške yra srauto per tūrį V ribojantį paviršių S vektoriaus santykio su šiuo tūriu riba, kai tūris artėja prie nulio: $div(\vec{q}) = \lim_{V \to 0} \left(\oiint_S \vec{q} \cdot d\vec{S} / V \right)$. Vektorių funkcijos $\vec{u}(x, y, z)$ divergencija yra skaliarinė funkcija, apskaičiuojama pagal lygtį $div(\vec{u}) = \partial u_x / \partial x + \partial u_y / \partial y + \partial u_z / \partial z$.

$$\iint_S \vec{q} \cdot d\vec{S} = \iiint_V div(\vec{q}) \cdot dV . \qquad (3.31)$$

Įvertinus (3.31) lygtį, (3.30) lygtis užrašoma taip:

$$\iiint_V \left(\partial\varphi / \partial\tau + div(\vec{q}) - \gamma \right) \cdot dV = 0 . \qquad (3.32)$$

Integralas pagal laisvai pasirinktą tūrį bus lygus nuliui tik tuo atveju, kai pointegralinis reiškinys bus lygus nuliui:

$$\partial\varphi / \partial\tau + div(\vec{q}) - \gamma = 0 . \qquad (3.33)$$

Ši lygtis ir yra pagrindinė substancijos – masės, energijos ir judėjimo kiekio pernašos lygtis. Ji gali turėti ir tokią išraišką:

$$\partial\varphi / \partial\tau = \gamma - div(\vec{q}). \qquad (3.34)$$

Naudojant (3.33) lygtį, galima gauti lygtis, aprašančias vienfazės anizotropinės tankios terpės greičių, temperatūros ir koncentracijų laukus. Jas naudojant galima išspręsti svarbius techninius uždavinius ir atlikti daugelio cheminės technologijos procesų analizę.

Toliau nagrinėsime dalinius pagrindinės masės, energijos ir judėjimo kiekio pernašos lygties atvejus.

3.2.1. Vientisojo srauto dėsnis

Nagrinėjamas skysčio tekėjimas, kuriame nėra tuštumų ir pertrūkių, kuri jame masė nei atsiranda, nei išnyksta. Tada pernaša vyksta tik konvekciniu būdu (t. y. $\vec{q}_m = 0$). Šiuo atveju pernašos potencialas yra tankis (t. y. $\varphi = \rho$). Tada (3.33) lygtis vadinama srauto vientisumo arba nenutrūkstamumo lygtimi ir užrašoma taip:

$$\partial\rho / \partial\tau + div\left(\vec{w} \cdot \rho\right) = 0. \qquad (3.35)$$

Sandaugos $\rho \cdot \vec{w}$ divergencija užrašoma išplėsta forma:

$$div(\vec{w} \cdot \rho) = \frac{\partial(w_x \cdot \rho)}{\partial x} + \frac{\partial(w_y \cdot \rho)}{\partial y} + \frac{\partial(w_z \cdot \rho)}{\partial z} =$$

$$= \rho \cdot \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + w_x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} .$$

Įrašę šią išraišką į (3.35) lygtį, gauname:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho \cdot \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right). \quad (3.35a)$$

Kairioji lygties pusė yra pilnoji arba substancinė parametrų išvestinė, kuri įvertina, kaip laikui bėgant keičiasi dalelės parametras (nagrinėjamuoju atveju tankis), kai ji juda kartu su medžiagos srautu:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}. \quad (3.36)$$

Taigi vientiso srauto pastovumo lygtį galima užrašyti taip:

$$d\rho/d\tau = -\rho \cdot div(\vec{w}).$$

Kad geriau suprastume substancinės išvestinės prasmę, naudodamiesi (3.36) lygtimi, surandame tankio diferencialą. Kadangi $w_x = dx/d\tau$, $w_y = dy/d\tau$, $w_z = dz/d\tau$, tankio diferencialas

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot d\tau + \frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial \rho}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot dz.$$

Tankio visiškas diferencialinis pasikeitimas susideda iš jo lokalinio pasikeitimo per laiką $\frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot d\tau$ ir konvekcinio pasikeitimo $(\frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial \rho}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot dz)$, kuris įvyksta tiriamajai skysčio dalelei judant kartu su srautu per laiką $d\tau$.

Analogiškai substancinės išvestinės vertė susideda iš konvekcinės dedamosios ($w_x \cdot \partial\rho/\partial x + w_y \cdot \partial\rho/\partial y + w_z \cdot \partial\rho/\partial z$) ir vietinės dedamosios $\partial\rho/\partial\tau$.

Substancinės išvestinės sąvoka gali būti pritaikyta bet kuriam tekančio skysčio parametrui.

Pvz., konvekcinė tankio kitimo dedamoji gali būti užrašyta taip:

$$w_x \cdot \partial\rho/\partial x + w_y \cdot \partial\rho/\partial y + w_z \cdot \partial\rho/\partial z = \vec{w} \cdot grad(\rho).$$

Ši išraiška gaunama iš skaliarinės vektorių sandaugos, atsižvelgiant į tai, kad $\vec{i} \cdot \vec{j} = \vec{i} \cdot \vec{k} = \vec{j} \cdot \vec{k} = 0$ ir $\vec{i} \cdot \vec{i} = \vec{j} \cdot \vec{j} = \vec{k} \cdot \vec{k} = 1$:

$$\vec{w} = w_x \cdot \vec{i} + w_y \cdot \vec{j} + w_z \cdot \vec{k} \quad \text{ir}$$

$$grad(\rho) = (\partial\rho/\partial x) \cdot \vec{i} + (\partial\rho/\partial y) \cdot \vec{j} + (\partial\rho/\partial z) \cdot \vec{k}.$$

Taigi sandaugos $\rho \cdot \vec{w}$, kaip ir bet kurios skaliaro ir vektoriaus sandaugos, divergencija

$$div(\rho) \cdot \vec{w} = \rho \cdot div(\vec{w}) + \vec{w} \cdot grad(\rho).$$

Tai leidžia užrašyti nenutrūkstamojo srauto lygtį dar viena forma:

$$\partial\rho/\partial\tau + \rho \cdot div(\vec{w}) + \vec{w} \cdot grad(\rho) = 0.$$

Kadangi nuostoviajam (stacionariajam) srautui $\partial\rho/\partial\tau = 0$, tai vientisojo srauto (3.35) lygtis supaprastėja:

$$div(\vec{w}) \cdot \rho = 0, \tag{3.37}$$

$$\partial(w_x \cdot \rho)/\partial x + \partial(w_y \cdot \rho)/\partial y + \partial(w_z \cdot \rho)/\partial z = 0. \tag{3.38}$$

Kai skystis nespūdus,

$$div(\vec{w}) = 0, \tag{3.39}$$

$$\partial(w_x)/\partial x + \partial(w_y)/\partial y + \partial(w_z)/\partial z = 0. \tag{3.40}$$

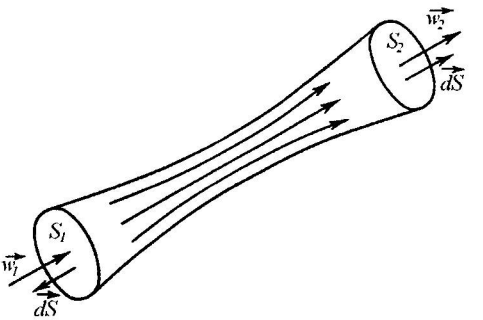
(3.40) lygtis yra srauto pastovumo diferencialinė lygtis, kai nespūdus skystis juda nuostoviai.

Suintegravus nuostoviojo vientisojo srauto (3.37) lygtį ir įvertinant Ostrogradskio ir Gauso teoremą, gaunama:

$$\iiint_V div\left(\vec{w} \cdot \rho\right) \cdot dV = \oiint_S \vec{w} \cdot \rho \cdot d\vec{S} = 0.$$

Integralas $\oiint_S w \cdot \rho \cdot d\vec{S}$ solenoidinio tekėjimo atveju (3.7 pav.), kada greičio vektoriai nesusikerta, gali būti suskaidytas į du integralus pagal galinius skerspjūvius, kadangi skystis juda tik per juos:

$$S = \oiint_{S=S_1+S_2} \vec{w} \cdot \rho \cdot d\vec{S} = - \iint_{S_1} \vec{w}_1 \cdot \rho_1 \cdot d\vec{S}_1 + \iint_{S_2} \vec{w}_2 \cdot \rho_2 \cdot d\vec{S}_2 = 0.$$



3.7 pav. Srautų judėjimas kintamo skerspjūvio kanalu

Jeigu greičių w_1 ir w_2 kryptys statmenos S_1 ir S_2 ir jie yra pastovūs, taip pat pastovūs ir tankiai ρ_1 ir ρ_2, tada gauname:

$$w_1 \cdot \rho_1 \cdot \iint_{S_1} dS_1 = w_2 \cdot \rho_{21} \cdot \iint_{S_2} dS_2 \quad \text{arba}$$

$$w_1 \cdot \rho_1 \cdot S_1 = w_2 \cdot \rho_2 \cdot S_2 . \qquad (3.41)$$

Esant bet kokiam nenutrūkstamojo srauto skerspjūviui, (3.41) lygtis užrašoma taip:

$$w \cdot \rho \cdot S = const. \qquad (3.42)$$

(3.42) lygtis vadinama vientisojo srauto nuostoviojo judėjimo lygties integraline forma.

Taigi esant nuostoviajam skysčio judėjimui, per kiekvieną jo skerspjūvį per laiko vienetą prateka ta pati skysčio masė. Todėl (3.42) lygtis taip pat vadinama debito pastovumo lygtimi. Todėl debito pastovumo lygtis yra dalinis masės tvermės dėsnio atvejis ir išreiškia srauto medžiagų balansą. Kadangi nespūdžių skysčių $\rho = const$, tai (3.42) lygtis užrašoma taip:

$$w \cdot S = const . \qquad (3.42a)$$

Reikia pasakyti, kad vientisojo srauto (3.42) ir (3.42a) lygtys integraline forma identiškos debito (3.15) ir (3.15a) lygtims, gautoms iš vidutinio srauto greičio apibrėžimo.

Esant tam tikroms srauto tekėjimo sąlygoms (pvz., staigiai sumažėjus slėgiui, akimirksniu užverdant skysčiams, kada sistemoje atsiranda tuštumų, srauto tekėjimo pertrūkių ir t. t.) vientisojo srauto lygtys nenaudojamos.

3.2.2. Šilumos pernašos lygtis

Nagrinėjama konvekcinė šilumos pernaša vienfazėje, vientisoje, pastovios temperatūros terpėje, kurios $c_p = const$, $\lambda = const$, $\rho = const$, taip pat $q_l = 0$.

Šilumos pernašos procesuose pernašos potencialas yra prilyginamas savitajai tūrio entalpijai $\varphi = c_p \cdot \rho \cdot t$.

Šilumos srauto tankis, atsiradęs sistemai artėjant prie termodinaminės pusiausvyros, nusakomas Furjė dėsniu ((3.49) lygtis). Tada pagrindinė substancijos (šilumos) pernašos lygtis vientiso nespūdaus skysčio sraute, išlaikant anksčiau nustatytas sąlygas, taip pat neišsiskiriant šilumai arba jos nešalinant ($\gamma = 0$), užrašoma taip:

$$\partial t/\partial \tau + div(\vec{w} \cdot t) = a \cdot div[grad(c_p \cdot t \cdot \rho)]. \qquad (3.43)$$

(3.43) lygtyje esančių sandaugų $\vec{w} \cdot t$ ir $grad(t)$ divergencija pagal analogiją su (3.35) lygtimi užrašoma taip:

$$div(\vec{w} \cdot t) = t \cdot div(\vec{w}) + \vec{w} \cdot grad(t), \qquad (3.44)$$

$$div[grad(t)] = \frac{\partial[(grad\,(t))_x]}{\partial x} + \frac{\partial[(grad(t))_y]}{\partial y} + \frac{\partial[(grad(t))_z]}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \nabla^2 t; \qquad (3.45)$$

čia $\nabla^2 t$ – Laplaso operatorius pagal temperatūrą.

Į (3.43) lygtį įrašę (3.44) ir (3.45) lygtis, gauname:

$$\partial t/\partial \tau + t \cdot div(\vec{w}) + \vec{w} \cdot grad(t) = a \cdot \nabla^2 t,$$

arba išplėsta forma:

$$\partial t/\partial \tau + t \cdot div(\vec{w}) + w_x \cdot \partial t/\partial x + w_y \cdot \partial t/\partial y + w_z \cdot \partial t/\partial z = a \cdot \nabla^2 t.$$

Kadangi nagrinėjamasis srautas yra nenutrūkstamas, tai $div(\vec{w}) = 0$. Todėl (3.43) lygtis, atsižvelgiant į anksčiau padarytas prielaidas, užrašoma taip:

$$\partial t/\partial \tau + \vec{w} \cdot grad(t) = a \cdot \nabla^2 t, \qquad (3.46)$$

arba išplėsta forma:

$$\partial t/\partial \tau + w_x \cdot \partial t/\partial x + w_y \cdot \partial t/\partial y + w_z \cdot \partial t/\partial z = a \cdot \nabla^2 t. \qquad (3.47)$$

(3.47) lygtis bendruoju pavidalu išreiškia temperatūros pasiskirstymą judančiame sraute. Ji vadinama diferencialine konvekcinės šilumos pernašos, laidumo judančiame sraute arba Furjė ir Kirchhofo lygtimi.

Esant nuostoviajai šilumos pernašai, $\partial t/\partial \tau = 0$. Tada (3.47) lygtis įgauna tokią išraišką:

$$w_x \cdot \partial t/\partial x + w_y \cdot \partial t/\partial y + w_z \cdot \partial t/\partial z = a \cdot \nabla^2 t. \qquad (3.48)$$

Nejudančioje terpėje greičio dedamosios pagal koordinačių ašis lygios nuliui ($w_x = w_y = w_z = 0$) ir (3.47) lygtis užrašoma taip:

$$\partial t/\partial \tau = a \cdot \nabla^2 t. \qquad (3.49)$$

Ši lygtis aprašo temperatūros pasiskirstymą nejudančioje aplinkoje, kurioje šiluma perduodama laidumo būdu. Ji vadinama diferencialine šilumos laidumo nejudančioje aplinkoje, arba Furjė, lygtimi.

Temperatūros laidumo koeficientas a yra fizikinis dydis, apibūdinantis kūno šilumos skverbties savybes. Kai kitos sąlygos vienodos, greičiau įšyla arba atvėsta tas kūnas, kurio temperatūrinio laidumo koeficientas a yra didesnis.

3.2.3. Masės pernašos lygtis

Diferencialinė konvencinės difuzijos lygtis išvedama taip pat, kaip ir šilumos pernašos lygtis.

Nagrinėsime masės pernašą vientisame skysčio sraute, esant pastoviam pernešamos medžiagos molekulinės difuzijos koeficientui D ir nesant masės šaltinių ($\gamma = 0$). Masės srauto tankis aprašomas (3.21) lygtimi – pirmuoju Fiko dėsniu.

Pagrindinė masės pernašos lygtis yra

$$\partial c/\partial \tau + div(\vec{w}) \cdot c = D \cdot div[grad(c)]. \qquad (3.50)$$

Atlikę analogiškus pertvarkymus, kaip ir išvesdami konvekcinių šilumos mainų lygtį, gausime tokią išraišką:

$$\partial c/\partial \tau + c \cdot div(\vec{w}) + \vec{w} \cdot grad(c) = D \cdot \nabla^2 c. \qquad (3.51)$$

Esant vientisajam srautui, kai $div(\vec{w}) = 0$, masės pernašos lygtis atrodo taip:

$$\partial c/\partial \tau + \vec{w} \cdot grad(c) = D \cdot \nabla^2 c, \qquad (3.52)$$

arba išskleista forma:

$$\partial c/\partial \tau + w_x \cdot \partial c/\partial x + w_y \cdot \partial c/\partial y + w_z \cdot \partial c/\partial z = D \cdot \left(\partial^2 c/\partial x^2 + \partial^2 c/\partial y^2 + \partial^2 c/\partial z^2\right) = D \cdot \nabla^2 c. \qquad (3.53)$$

Ši lygtis bendruoju pavidalu išreiškia komponento koncentracijos pasiskirstymą judančiame sraute vykstant nenuostoviajai masės pernašai. Lygtis dar vadinama diferencialine konvekcinės difuzijos lygtimi.

Esant nuostoviajam masės perdavimui, kai $\partial c/\partial \tau = 0$,

$$w_x \cdot \partial c/\partial x + w_y \cdot \partial c/\partial y + w_z \cdot \partial c/\partial z = D \cdot \nabla^2 c. \qquad (3.54)$$

Molekulinės difuzijos koeficientas D yra fizikinė konstanta, apibūdinanti medžiagos gebėjimą difuzijos būdu skverbtis nejudančioje aplinkoje. Jis priklauso nuo difunduojančios medžiagos ir difuzijos terpės cheminės kilmės, proceso temperatūros bei slėgio ir nepriklauso nuo hidrodinaminių proceso sąlygų. Difuzijos koeficientas yra analogiškas temperatūrinio laidumo koeficientui a. Taigi (3.53) lygtis yra tokios pat struktūros kaip diferencialinė šilumos pernašos (3.47) lygtis.

Kadangi nejudančioje aplinkoje $w_x = w_y = w_z = 0$, tai (3.53) lygtis aprašo tiriamosios medžiagos koncentracijos pasiskirstymą nejudančioje terpėje ir yra vadinama diferencialine molekulinės difuzijos lygtimi, arba antruoju Fiko dėsniu, ir gali būti užrašyta taip:

$$\partial c/\partial \tau = D \cdot \left(\partial^2 c/\partial x^2 + \partial^2 c/\partial y^2 + \partial^2 c/\partial z^2\right) = D \cdot \nabla^2 c. \qquad (3.55)$$

3.2.4. Judėjimo kiekio pernašos lygtys

Žinoma, kad izoliuotoms sistemoms tinka judėjimo kiekio arba impulso tvermės dėsnis: izoliuotą sistemą sudarančių dalelių impulsų suma yra pastovus dydis. Neizoliuotos sistemos impulso kitimo greitis lygus ją veikiančioms išorinėms jėgoms.

Nagrinėsime laisvai pasirinktą skysčio tūrį, judantį sunkio jėgos lauke. Pasirinktą tūrį supantis skystis veikia jį paviršinėmis slėgio ir vidinės trinties

jėgomis. Sunkio jėga yra tūrio jėga ir nepriklauso nuo tiriamojo tūrio sąveikos su aplinka.

Nagrinėjamąją sistemą galima padaryti izoliuotą, įterpiant į ją su tiriamuoju tūriu sąveikaujantį skystį. Tokiu atveju slėgio ir vidinės trinties jėgos įeis į impulso kitimo laikui bėgant greitį. Vienintelė iš nagrinėjamų jėgų – sunkio jėga neleidžia sistemos izoliuoti ir sukelia impulso kitimą laikui bėgant. Taigi sunkio jėga yra išorinė jėga. Ji apibūdinama impulso pritekėjimo tūriniu tankiu. Kadangi impulso pritekėjimo per laiko vienetą greitis lygus jėgai, veikiančiai kūną (elementarų tūrį), todėl tūrinis šaltinio tankis yra lygus tūrio vieneto sunkio jėgai: $\vec{\gamma} = \rho \cdot \vec{g}$.

Impulso pernaša aprašoma pagrindine masės, energijos ir judėjimo kiekio pernašos lygtimi. Skysčio judėjimo matematiniam aprašymui suprasti panagrinėsime impulso dedamųjų pagal kiekvieną koordinačių ašį pernašą, kai teka izotropinis, klampus bei nespūdus skystis ir jį pagal šias ašis veikia tūrį veikiančių jėgų projekcijos.

Impulso pernašos varos jėgos dedamosios pagal z ašį yra tūrio vieneto impulso projekcija į z ašį: $\varphi_z = \rho \cdot w_z$.

Šaltinio impulso tankio vektoriaus projekcija į z ašį užrašoma taip:

$$\gamma_z = [\vec{g}] \cdot [\vec{k}] \cdot \cos\alpha;$$

čia $\vec{k}$ – z ašies vienetinis vektorius; α – kampas tarp vektorių $\vec{g}$ ir $\vec{k}$.

Kadangi tarp vektorių $\vec{g}$ ir $\vec{k}$ yra 180° kampas, tai galioja tokia lygtis:

$$\gamma_z = -\rho \cdot g. \qquad (3.56)$$

Impulso molekulinio srauto tankis supaprastintu variantu gali būti išreikštas Niutono vidinės trinties dėsniu ((3.8) lygtis) arba tiksliau – apibendrintu Niutono dėsniu ((3.11) lygtis).

Panagrinėsime supaprastintą variantą. Tariame, kad vektoriaus $\vec{w}$ projekcija į z ašį yra visų trijų koordinačių funkcija, todėl vidinės trinties įtempiai, atsirandantys dėl šių pakyčių, apytiksliai išreiškiami Niutono vidinės trinties dėsniu ((3.8) lygtis). Tada tangentinių įtempių, veikiančių x ir y ašims statmenose plokštumose, projekcijos į z ašį užrašomos taip:

$$\tau_{xz} = \mu \cdot \partial w_z / \partial x; \qquad \tau_{yz} = \mu \cdot \partial w_z / \partial y. \qquad (3.57)$$

Veikiant trinties jėgai xy plokštumą, atsiradusių statmenų normalinių įtempių projekcija į z ašį išreiškiama analogiškai:

$$(\tau_{zz})_T = \mu \cdot \partial w_z / \partial z . \qquad (3.58)$$

Kadangi hidrostatinio slėgio jėga visomis kryptimis vienoda, tai atsiradę *xy* plokštumai statmeni normaliniai įtempiai, kurių projekcija į *z* ašį aprašoma (3.58) lygtimi, išreiškiami taip:

$$(\tau_{zz})_P = -P . \qquad (3.58a)$$

Tada normalinių įtempių projekcijų į *z* ašį suma

$$\tau_{zz} = -P + \mu \cdot \partial w_z / \partial z . \qquad (3.59)$$

Remdamiesi šiomis įtempio projekcijomis į *z* ašį ((3.59) lygtis), gausime joms ekvivalentinę impulso tankio lygtį. Atsižvelgdami į tai, kad įtempių skaitinės vertės lygios impulso molekulinio srauto tankiui su priešingu ženklu ((3.8) lygtis) ir kad impulso srautas nukreiptas plokštumos, kurią veikia tangentiniai įtempiai τ_{xz} ir τ_{yz}, normalės kryptimi, gausime impulso molekulinio srauto tankio išraišką vektorine forma:

$$q_{mz} = -\left(\tau_{xz} \cdot \vec{i} + \tau_{yz} \cdot \vec{j} + \tau_{zz} \cdot \vec{k} \right). \qquad (3.60)$$

Impulso konvekcinio srauto tankis, remiantis (3.20) lygtimi, išreiškiamas taip:

$$q_{kz} = \vec{w} \cdot \rho \cdot w_z . \qquad (3.60a)$$

Į pagrindinę masės, energijos ir judėjimo kiekio pernašos (3.33) lygtį įrašę srauto tankius ir impulso šaltinius, išreikštus (3.56), (3.60) ir (3.60a) lygtimis, gausime judėjimo kiekio pernašos lygtį *z* ašiai, kai teka izotropinis, klampus ir nespūdus skystis:

$$\partial(w_z \cdot \rho) \Big/ \partial\tau = -div\left[\vec{w} \cdot \rho \cdot w_z - \left(\tau_{xz} \cdot \vec{i} + \tau_{yz} \cdot \vec{j} + \tau_{zz} \cdot \vec{k} \right) \right]. \qquad (3.61)$$

Pagal (3.57)–(3.59) lygtis užrašę įtempius τ_{xz}, τ_{yz} ir τ_{zz} bei išreiškę srautų tankio divergenciją (kvadratiniuose (3.61) lygties skliaustuose), gauname išskleistą impulso pernašos pagal *z* ašį lygtį:

$$\rho \cdot \frac{\partial w_z}{\partial \tau} = -\rho \cdot \left(w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \\ - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho \cdot g + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right). \qquad (3.62)$$

Naudodami substancinę išvestinę ir Laplaso operatorių, užrašysime impulso pernašos pagal z ašį lygtį glausčiau:

$$\rho \cdot dw_z / d\tau = -\rho \cdot g - \partial p / \partial z + \mu \cdot \nabla^2 w_z \,. \qquad (3.63)$$

Kadangi impulso šaltinio vektoriaus projekcijos į x ir y ašis lygios nuliui, gausime judėjimo kiekio pernašos pagal x ir y ašis lygtis:

$$\partial(w_x \cdot \rho) / \partial \tau = -div\left[\vec{w} \cdot \rho \cdot w_x - \left(\tau_{xx} \cdot \vec{i} + \tau_{yx} \cdot \vec{j} + \tau_{zx} \cdot \vec{k}\right)\right];$$

$$\partial(w_y \cdot \rho) / \partial \tau = -div\left[\vec{w} \cdot \rho \cdot w_y - \left(\tau_{xy} \cdot \vec{i} + \tau_{yy} \cdot \vec{j} + \tau_{zy} \cdot \vec{k}\right)\right]. \qquad (3.64)$$

Užrašę (3.63) ir (3.64) lygtis glausčiau, gausime lygčių sistemą, aprašančią impulso pernašą, kai teka izotropinis, klampus ir nespūdus skystis. Gauta lygčių sistema vadinama Navjė ir Stokso lygčių sistema:

$$\begin{cases} \rho \cdot dw_x / d\tau = -\partial p / \partial x + \mu \cdot \nabla^2 w_z, \\ \rho \cdot dw_y / d\tau = -\partial p / \partial y + \mu \cdot \nabla^2 w_y, \\ \rho \cdot dw_z / d\tau = -\rho \cdot g - \partial p / \partial z + \mu \cdot \nabla^2 w_z; \end{cases} \qquad (3.65)$$

čia $\rho \cdot g$ – tūrio vieneto išorinė jėga (sunkio jėga); $\partial p / \partial x$, $\partial p / \partial y$, $\partial p / \partial z$ – tūrio vieneto slėgio jėgos; $\mu \cdot \nabla^2 w_x$, $\mu \cdot \nabla^2 w_y$, $\mu \cdot \nabla^2 w_z$ – klampiosios trinties jėgos vienam tūrio vienetui.

Navjė ir Stokso lygčių sistema yra viena iš judėjimo kiekio tvermės dėsnio išraiškų. Judėjimo kiekio tvermės dėsnis gali būti suformuluotas taip: judėjimo kiekio projekcijos į koordinačių ašį laiko išvestinė yra lygi sistemą veikiančių jėgų projekcijų į ašį sumai.

Visi Navjė ir Stokso lygčių dėmenys yra jėgos, tenkančios tūrio vienetui. Kitos pusės, $-\partial p / \partial x + \mu \cdot \nabla^2 w_x$, $-\partial p / \partial y + \mu \cdot \nabla^2 w_y$, $-\partial p / \partial z + \mu \cdot \nabla^2 w_z$,– tai impulso tankio divergencija, o $\rho \cdot g$ – impulso šaltinio tankis.

Reikia pabrėžti, kad (3.65) lygčių sistema taikytina tik nespūdiems skysčiams. Jei skystis spūdus, kiekvienos lygties dešinioji pusė būna sudėtingesnė.

Navjė ir Stokso ir vientisojo srauto lygtys, papildytos pradinėmis ir ribinėmis sąlygomis, naudojamos greičių ir slėgių laukams aprašyti.

Bendruoju atveju Navjė ir Stokso lygčių sistemos analitiškai išspręsti negalima. Šios sistemos sprendiniai gaunami tik supaprastintais daliniais atvejais.

Sprendžiant Navjė ir Stokso lygtis, plačiai taikomi panašumo teorijos metodai, leidžiantys gauti (naudojant eksperimentinius rezultatus) gana paprastas funkcines priklausomybes.

Klampiųjų skysčių judėjimo teorinė analizė, naudojant Navjė ir Stokso lygtis, atliekama atskirai srauto branduoliui ir pasienio sluoksniui. Esant turbulentiniam tekėjimo režimui (didelėms Reinoldso kriterijaus vertėms), rašant lygtis srauto branduoliui, galima nepaisyti paskutinių Navjė ir Stokso lygties dešiniosios pusės narių, apibūdinančių vidinės trinties jėgas (kadangi jie gerokai mažesni už kitus lygties narius), ir nagrinėti skystį kaip idealų neklampų ir nespūdų skystį ($\rho = const$). Idealaus skysčio judėjimo lygčių analizė gerokai paprastesnė.

Idealiam skysčiui Navjė ir Stokso (3.65) lygtys pavirsta Eulerio diferencialinėmis judėjimo lygtimis:

$$\begin{aligned} &\rho \cdot \partial w_x / \partial \tau = -\partial p / \partial x; \\ &\rho \cdot \partial w_y / \partial \tau = -\partial p / \partial y; \\ &\rho \cdot \partial w_z / \partial \tau = -\rho \cdot g - \partial p / \partial z. \end{aligned} \qquad (3.66)$$

Šių lygčių integralas stacionariam srautui yra Bernulio lygtis, plačiai naudojama sprendžiant daugelį techninių uždavinių.

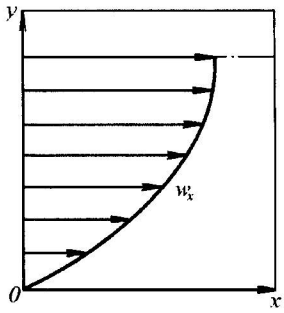
Navjė ir Stokso lygtys, aprašančios skysčio judėjimą pasienio sluoksnyje (kuris dėl nedidelio storio nagrinėjamas kaip plokščias), taip pat gerokai suprastinamos. Jeigu nagrinėjamas srautas išilgai x ašies, galima teigti, kad $w_z = 0$, $w_y << w_x$ ir $\partial^2 w_z / \partial z^2 = 0$. Kadangi atstumas y ašies kryptimi (storis) gerokai mažesnis negu x ašies kryptimi, galima tarti, kad $\partial^2 w_x / \partial y^2 >> \partial^2 w_x / \partial x^2$.

Jeigu greitis srauto branduolyje nekinta, tai, remiantis pirmąja (3.66) lygčių sistemos lygtimi, slėgio gradientas lygus nuliui. Kadangi pasienio sluoksnio storis nedidelis, tai slėgis jame sutampa su slėgiu srauto branduolyje. Šie suprastinimai leidžia Navjė ir Stokso lygtis pasienio sluoksniui užrašyti taip:

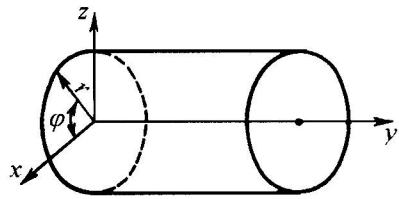
$$w_x \cdot \partial w_x / \partial x + w_y \cdot \partial w_x / \partial y = \nu \cdot \partial^2 w_x / \partial y^2. \qquad (3.67)$$

Pasienio sluoksnio judėjimo lygtys sprendžiamos kartu su vientisojo srauto lygtimi:

$$\partial w_x / \partial x + \partial w_y / \partial y = 0. \qquad (3.68)$$



3.8 pav. Srauto greičio priklausomybė nuo pasienio sluoksnio storio, sluoksniui judant išilgai plokščiojo paviršiaus



3.9 pav. Stacionarus laminarinis srautas cilindrinėje koordinačių sistemoje

(3.67) ir (3.68) lygčių sistemos ribinės sąlygos užrašomos taip:

$w_x = w_y = 0$, kai $y = 0$ (sienelės paviršiuje greitis lygus nuliui),

$w_x \to w_{x0}$, kai $y \to \infty$ (w_{x0} greitis srauto branduolyje).

Kai skystis yra rimties būsenos ($w_x = w_y = w_z = 0$), Navjė ir Stokso (3.66) lygtis tampa Eulerio diferencialine pusiausvyros lygtimi:

$$-\partial p/\partial x = 0; \quad -\partial p/\partial y = 0; \quad -\rho \cdot g - \partial p/\partial z = 0. \qquad (3.69)$$

Šių lygčių integralas rimties būsenos skysčiui yra pagrindinė hidrostatikos lygtis.

Navjė ir Stokso lygtys gali būti užrašomos naudojant cilindrines koordinačių sistemas (1). Panagrinėsime Navjė ir Stokso lygtį cilindrinių koordinačių sistemoje stacionariam laminariniam srautui judant horizontaliu vienodo skerspjūvio vamzdžiu.

Srautas juda išilgai y ašies (3.9 pav.). Šiuo atveju ryšys tarp cilindrinių koordinačių ir Dekarto koordinačių išreiškiamas lygtimis:

$$x = r \cdot \cos\varphi; \quad z = r \cdot \sin\varphi; \quad y = y; \quad r^2 = x^2 + z^2. \qquad (3.70)$$

Panaudojus (3.65) lygties išraišką, Navjė ir Stokso lygtis y ašiai užrašoma taip:

$$\rho \cdot \frac{dw_y}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right).$$

Nustatomi apribojimai:

- kadangi srautas stacionarus, $\partial w_y/\partial \tau = 0$;
- kadangi srautas juda laminariniu būdu išilgai y ašies, $w_x = w_z = 0$;
- kadangi vamzdyno skerspjūvis yra pastovus, $\partial w_y/\partial y = 0$.

Tada Navjė ir Stokso lygtį galime užrašyti taip:

$$\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}. \qquad (3.71)$$

Tiriamuoju atveju srautas yra simetriškas y ašies atžvilgiu, o greitis priklauso tik nuo r ir nepriklauso nuo kampo φ. Dėl to (3.71) lygtį pateikti cilindrinėse koordinatėse tampa paprasčiau, kadangi reikia apskaičiuoti tik kairiąją lygties pusę kaip r funkciją:

$$\partial^2 w_y / \partial x^2 + \partial^2 w_y / \partial z^2 = f(r);$$

čia $r = \sqrt{x^2 + z^2}$.

Išdiferencijavę gauname:

$$\frac{\partial w_y}{\partial x} = \frac{\partial w_y}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial x}; \quad \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w_y}{\partial r^2} \cdot \left(\frac{\partial r}{\partial x}\right)^2 + \frac{\partial w_y}{\partial r} \cdot \frac{\partial^2 r}{\partial x^2}. \qquad (3.72)$$

Išvestinių $\partial r/\partial x$ ir $\partial^2 r/\partial x^2$ vertės gaunamos diferencijuojant (3.70) lygtį:

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x}{r}; \quad \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} = \frac{1}{r} \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2\right].$$

Įrašę $\partial r/\partial x$ ir $\partial^2 r/\partial x^2$ vertes į (3.72) lygtį, gausime:

$$\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w_y}{\partial r^2} \cdot \left(\frac{x}{r}\right)^2 + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w_y}{\partial r} \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2\right]. \qquad (3.73)$$

Analogišką rezultatą gausime ir išvestinei $\partial^2 w_y / \partial z^2$:

$$\frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 w_y}{\partial r^2} \cdot \left(\frac{z}{r}\right)^2 + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w_y}{\partial r} \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{r}\right)^2\right]. \qquad (3.74)$$

Sumuodami atskirai (3.73) ir (3.74) lygčių kairiąsias ir dešiniąsias puses, gauname:

$$\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2}=\frac{\partial^2 w_y}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial w_y}{\partial r}=\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r\cdot\frac{\partial w_y}{\partial r}\right).$$

Į hidrostatinio slėgio kitimą pagal horizontalaus vamzdžio skersmenį neatsižvelgiama, o atsižvelgiama tik į slėgio kitimą išilgai vamzdžio ašies (y ašies). Tada $p = f(y)$.

Taigi (3.71) lygties kairioji ir dešinioji pusės yra skirtingų argumentų r (kairioji) ir y (dešinioji) funkcijos. Taip užrašyti galima, jeigu kairioji ir dešinioji (3.71) lygties pusės yra pastovios:

$$\partial p/\partial y = const = (p_2 - p_1)/L = -(p_1 - p_2)/L;$$

čia L – vamzdžio ilgis.

Todėl nagrinėjamu atveju Navjė ir Stokso lygtį cilindrinių koordinačių sistemai galime užrašyti taip:

$$\frac{1}{r}\cdot\frac{d}{dr}\left(r\cdot\frac{dw_y}{dr}\right)=-\frac{p_1-p_2}{\mu\cdot L}. \qquad (3.75)$$

4 dalis

CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS PROCESŲ MODELIAVIMAS

Perspektyviausias cheminės technologijos procesų tyrimo ir uždavinių sprendimo metodas yra teorinis metodas, pagrįstas išsamiai procesą aprašančios diferencialinių lygčių (pvz., 3 dalyje lygtys pateiktos nagrinėjant masės, energijos ir impulso pernešimą) sistemos sudarymu ir jų sprendimu. Daliniams supaprastintiems atvejams šių lygčių sistema yra išspręsta ir kai kurie iš šių sprendinių bus pateikti kitose vadovėlio dalyse. Pvz., sprendžiant Eulerio skysčių pusiausvyros ir skysčio nuostoviojo judėjimo lygtis, gaunamos dažnai naudojamos pagrindinė hidrostatikos ir Bernulio lygtys.

Diferencialinės lygtys aprašo visą grupę vienodų reiškinių. Pvz., vienodomis Navjė ir Stokso lygtimis aprašomi tokie iš pirmo žvilgsnio skirtingi reiškiniai, kaip skysčio tekėjimas kanalais ir didelių kiekių okeano vandens ir atmosferos oro judėjimas. Kad būtų galima praktiškai naudoti šias lygtis, reikia nustatyti apribojimus, sąlygojamus konkrečių reiškinių (procesų) savybių. Cheminės technologijos procesų tokie apribojimai gali būti: aparatų geometrinių charakteristikų, medžiagų fizikinių savybių ir kt. kitimo ribos. Todėl konkrečiam reiškiniui išskirti iš visos klasės panašių reiškinių, aprašomų bendra diferencialinių lygčių sistema, reikia šias lygtis apriboti papildomomis sąlygomis, kurios vadinamos vienareikšmiškumo sąlygomis, t. y. sąlygomis, kurios visiškai ir vienareikšmiškai apibūdina tiriamąjį reiškinį (pvz., sočiųjų garų temperatūra visiškai ir vienareikšmiškai nusako jų slėgį).

Į vienareikšmiškumo sąlygas įtraukiama: 1) sistemos (aparato) geometrinė forma ir dydis; 2) procese dalyvaujančių medžiagų fizikinės savybės; 3) pradinės sąlygos (pradinis greitis, pradinė temperatūra, koncentracija ir t. t.); 4) ribinės sąlygas (srauto greitis prie kanalo sienelės lygus nuliui ir kt.).

Tačiau daugelis cheminės technologijos procesų yra tokie sudėtingi, kad pavyksta sudaryti tik juos aprašančią diferencialinių lygčių sistemą ir nustatyti vienareikšmiškumo sąlygos. Išspręsti tokią lygčių sistemą žinomais matematiniais metodais paprastai nėra galimybės. Tokiais atvejais taikomas modelia-

vimo metodas. Modeliavimu suprantamas objekto – originalo tyrimas, tiriant jo modelį. Į modeliavimą įeina ir modelio sukūrimas.

Modeliavimas plačiai taikomas įvairiose technikos srityse: hidraulikoje, hidrotechnikoje (nustatant hidrotechninių įrenginių įvairias konstrukcines ir eksploatacines charakteristikas); aviacijoje; raketinėje ir kosminėje technikoje (nustatant aparatų ir jų variklių charakteristikas); laivų statyboje (nustatant laivų korpusų charakteristikas); šiluminėje technikoje (konstruojant ir eksploatuojant įvairius šiluminius aparatus) ir kitur.

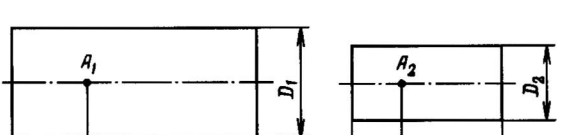
Chemijos inžinerijos pagrindinis tyrimo metodas yra modeliavimas. Čia modeliavimu suprantamas cheminės technologijos procesų tyrimas naudojant modelius, kurie nuo modeliavimo objekto – originalo skiriasi tik masteliu. Modeliuoti galima dviem pagrindiniais metodais: apibendrintų kintamųjų arba panašumo teorijos (fizikinis modeliavimas); skaitmeninio eksperimento (matematinis modeliavimas). Principinio skirtumo tarp šių abiejų metodų nėra, kadangi jie remiasi eksperimentų duomenimis ir skiriasi tik jų apdorojimu ir analize. Geriausi rezultatai gaunami derinant šiuos abu metodus. Kai kur literatūroje nurodoma, kad tai yra ne du skirtingi metodai, o du skirtingi modeliavimo etapai.

4.1. Apibendrintų kintamųjų metodas

Apibendrintų kintamųjų metodas sudaro panašumo teorijos esmę. Pagal pagrindinį panašumo teorijos principą reikia iš klasės bendru dėsniu aprašomų reiškinių (skysčių judėjimas, difuzija, laidumas šilumai ir kt.) išskirti grupę panašių.

Panašiais vadinami tokie reiškiniai, kuriuos atitinkančių ir apibūdinančių dydžių santykiai yra pastovūs dydžiai. Skiriami tokie panašumai: a) geometrinis; b) laiko; c) fizikinių dydžių; d) pradinių ir ribinių sąlygų. Esant geometriniam panašumui, originalas ir modelis yra tos pačios geometrinės formos, o atitinkamų jų dydžių (ilgio, skersmens ir kt.) santykis pastovus.

Panagrinėkime sudėtingą reiškinį – dujų judėjimą besisukančiame cilindre. Aparate (originale) vykstančiam procesui tirti gaminamas jo fizikinis modelis (4.1 pav., *a, b*). Originalo ir modelio atitinkamų linijinių matmenų santykis turi būti pastovus.



a *b*

4.1 pav. Originalo (*a*) ir jo modelio (*b*) principinės schemos

Jeigu nagrinėjama sistema – originalas juda, tai, esant geometriniam panašumui, visi jos taškai turi judėti pagal trajektorijas, panašias į atitinkamų sistemos – modelio taškų trajektorijas, t. y. nueina geometriškai panašius kelius (atkarpos l_1 ir l_2). Geometrinis panašumas išlaikomas, kai atitinkamų originalo ir modelio matmenų santykiai lygūs:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{l_1}{l_2} = ... = a_l = const.$$

Bedimensis dydis a_l vadinamas geometrinio panašumo konstanta arba mastelio (perėjimo) daugikliu. Panašumo konstanta apibūdina panašių sistemų atitinkamų vienavardžių dydžių santykį ir leidžia pereiti nuo vienos sistemos (modelio) matmenų prie kitos sistemos (originalo) matmenų.

Laiko panašumas reiškia, kad geometriškai panašių sistemų (originalo ir modelio) atitinkamų taškų arba dalių judėjimo geometriškai panašiomis trajektorijomis trukmių santykis yra pastovus. Per šį laiką taškai taip pat nueina geometriškai panašius kelius. Laiko panašumo konstanta užrašoma tokia lygtimi:

$$T_1/T_2 = \tau_1/\tau_2 = a_\tau ;$$

čia T_1 ir T_2 – laikas, per kurį atitinkamos originalo ir modelio dalelės pereina visą aparatą; τ_1 ir τ_2 – laikas, per kurį atitinkamos dalelės nueina panašius kelius l_1 ir l_2; a_τ – laiko panašumo konstanta.

Fizikinių dydžių panašumas reiškia, kad tiriamų panašių sistemų bet kuriuose dviejuose atitinkamuose originalo ir modelio taškuose fizikinių dydžių arba dalelių, panašiai išdėstytų erdvėje ir laike, verčių santykis yra pastovus dydis. Pvz., jeigu skysčio srautas originale apibūdinamas fizikiniais dydžiais μ_1, ρ_1 (4.1 pav., a), o modelyje – μ_2, ρ_2, tai atitinkamuose taškuose A_1 ir A_2 užrašome:

$$\mu_1/\mu_2 = a_\mu = const; \quad \rho_1/\rho_2 = a_\rho = const; \quad u_1/u_2 = a_u = const;$$

čia u_1 ir u_2 – bet koks galimas fizikinis dydis, pvz., šilumos laidumas, entalpija (bendruoju atveju $a_\mu \neq a_\rho \neq a_l \neq a_\tau$ ir t. t.).

Fizikinių dydžių panašumas jungia ne tik fizikinių konstantų, bet ir fizikinių dydžių verčių visumos arba fizikinių dydžių laukų panašumą. Taigi, esant geometriniam ir laiko panašumui, bus panašūs ir greičių, temperatūrų, koncentracijų ir kitų fizikinių dydžių laukai, t. y.

$$w_1/w_2 = a_w = const, \; t_1/t_2 = a_t = const, \; c_1/c_2 = a_c = const.$$

Pradinių ir ribinių sąlygų panašumas reiškia, kad sistemų (originalo ir modelio) pradinė būklė ir būklė sistemų ribose yra panašios, t. y. parametrų

verčių santykiai sistemų pradžioje ir jų ribose yra pastovūs. Tai galioja tik tais atvejais, kada išlaikomas sistemų pradinių ir ribinių sąlygų geometrinis, laiko ir fizikinis panašumas, t. y.

$$L_1/L_2 = a_l = const;\ \mu_1/\mu_2 = a_\mu = const.$$

Tuo pabrėžiama pradinių ir ribinių sąlygų panašumo svarba, nes kai kada sistemos pagrindiniame tūryje panašumas gali būti išlaikytas tik iš dalies. Kartu net dėl nedidelio pradinių ir ribinių sąlygų nukrypimo gali būti iš esmės pažeista sistemos panašumo visuma (pvz., visos sistemos smarkaus sužadinimo (sudirginimo) pasikeitimas veikiant vadinamiesiems „įtekėjimo efektams").

Visos panašumo konstantos pastovios visiems panašių sistemų taškams, bet keičiasi, kintant originalo ir modelio matmenų santykiui. Kitais žodžiais tariant, originalo ir į jį panašaus kito modelio atitinkamų vienavardžių dydžių santykis bus kitas. Tai labai apsunkina keisti modelio mastelį, todėl naudojami vadinamieji panašumo invariantai (lot. *invarians* – nesikeičiantis).

Panašumo invariantai ir panašumo kriterijai. Jeigu visus atitinkamus tiriamosios sistemos (originalo) ir į jį panašios sistemos (modelio) būklę nusakančius dydžius išreiškiame santykiniais vienetais, t. y. imame kiekvienai sistemai vienavardžių dydžių santykį, tai šis dydis taip pat bus pastovus ir bedimensis, pvz.:

$$L_1/D_1 = L_2/D_2 = ... = inv = idem = i_l;\quad T_1/\tau_1 = T_2/\tau_2 = ... = i_\tau\ . \quad (4.1)$$

Dydžiai i_l, i_τ ir t. t. nepriklauso nuo originalo ir modelio matmenų santykio, t. y. bet kuriam modeliui turės tas pačias vertes. Taigi originalo geometrinių matmenų, laiko ir fizikinių konstantų santykiai lygūs modelio tų pačių dydžių santykiams. Pereinant nuo vienos sistemos prie kitos į ją panašios, dydžių i_l, i_τ vertės lieka nepasikeitusios. Todėl bedimensis dydis i, išreiškiantis panašių sistemų dviejų vienavardžių dydžių santykį, vadinamas panašumo invariantu.

Panašumo invariantai, išreikšti vienavardžių dydžių santykiu, vadinami simpleksais (lot. *simplex* – paprastas) arba parametriniais kriterijais (graik. *kriterion* – požymis, aptarimo priemonė). Pvz., santykis L_1/D_1 vadinamas geometriniu simpleksu arba geometriniu parametriniu kriterijumi. Panašumo invariantai, išreikšti skirtingų dydžių, turinčių skirtingus matavimo vienetus, santykiais, vadinami panašumo kriterijais. Paprastai jie žymimi žymių mokslininkų pavardžių pirmosiomis raidėmis (pvz., *Re* – Reinoldso kriterijus arba skaičius).

Galima sudaryti bet kokio fizikinio reiškinio kriterijus. Tam būtina turėti analitinę priklausomybę tarp nagrinėjamo reiškinio kintamųjų dydžių. Panašumo kriterijai, kaip ir panašumo invariantai, yra bedimensiai dydžiai, kurių vertės kiek-

viename tiriamosios sistemos taške gali keistis, bet atitinkamuose panašių sistemų taškuose nepriklauso nuo atitinkamų originalo ir modelio dydžių.

Taigi panašūs reiškiniai apibūdinami panašumo kriterijais, kurių skaitinės vertės yra vienodos. Panašumo kriterijų atitinkamuose originalo ir modelio taškuose lygybė yra vienintelis kiekybinis procesų panašumo įvertinimas. Originalo ir į jį panašaus modelio kriterijų santykis:

$$\frac{w_1 \cdot d_1 \cdot \rho_1/\mu_1}{w_2 \cdot d_2 \cdot \rho_2/\mu_2} = 1 \text{ arba } \frac{(w_1/w_2)\cdot(d_1/d_2)\cdot(\rho_1/\rho_2)}{\mu_1/\mu_2} = \frac{a_w \cdot a_l \cdot a_\rho}{a_\mu} = 1.$$

Jeigu panašumo konstantų santykis lygus vienetui, jis vadinamas panašumo indikatoriumi ir rodo, kad panašumo kriterijai vienodi.

Jeigu panašumo konstantos nustatytos iš vienareikšmiškumo sąlygų, tai iš jų sudaryti kriterijai vadinami apibrėžiančiaisiais arba nusakančiaisiais. Kriterijai, į kuriuos įrašytas ieškomasis dydis, vadinami apibrėžiamaisiais arba nusakomaisiais. Bet kokia panašumo kriterijų kombinacija taip pat yra tiriamojo reiškinio panašumo kriterijus.

Konkrečios panašių procesų grupės panašumo kriterijai turi nustatytas skaitines vertes. Pakeitus tiriamąją panašių procesų grupę kita, aprašoma tomis pačiomis diferencialinėmis lygtimis, esant tam pačiam panašumo kriterijų rinkiniui, kriterijų skaitinės vertės bus kitos (pvz., skirtingos ir panašios sistemos turi skirtingas geometrines charakteristikas, skiriasi srauto greičiai ir t. t.). Iš to išeina, kad bet kuri kintamųjų, apibūdinančių bet kokį reiškinį, tarpusavio priklausomybė (t. y. diferencialinių lygčių sistema) gali būti pakeista panašumo kriterijų tarpusavio priklausomybe:

$$f(K_1, K_2, K_3, ...) = 0. \qquad (4.2)$$

Ši priklausomybė vadinama apibendrintąja kriterijų lygtimi, o panašumo kriterijai K_i – apibendrintaisiais kintamaisiais.

Panašumo teorija įgalina gauti diferencialinės lygties sprendinį ir apdoroti eksperimentiškai gautus duomenis naudojant apibendrintųjų kriterijų (4.1) lygtį. Varijuojant panašumo kriterijais ir atsisakant kai kurių į (4.1) lygties panašumo kriterijus įeinančių dydžių eksperimentinio tyrimo, galima sumažinti eksperimentų skaičių, norint gauti konkrečias (4.1) tipo lygtis.

Paprastai (4.1) lygtis užrašoma kaip apibrėžiamojo kriterijaus, į kurį įeina ieškomasis dydis, priklausomybė nuo apibrėžiančiųjų:

$$K_1 = f_1(K_2, K_3, ...). \qquad (4.3)$$

(4.2) lygties analitinė išraiška gali būti tokia $K_1 = A \cdot K_2^n \cdot K_3^m \cdot ...$;

čia K_1 – apibrėžiamasis panašumo kriterijus; koeficiento A ir laipsnio rodiklių n, m vertės nustatomos eksperimentiškai.

Jeigu tiriamojo proceso kurio nors kriterijaus efektas tampa gerokai silpnesnis už kitus (kriterijų skaitinės vertės šiuo atveju gali būti labai mažos arba didelės), tai kriterijaus įtakos galima nepaisyti. Tokiu atveju kriterijai, apibūdinantys efekto intensyvumą, gali būti nenagrinėjami ir procesas įgauna automodeliškumo, t. y. nepriklausomybės nuo šių kriterijų, savybę. Toks modeliavimas vadinamas apytiksliu.

Panašumo teorija nurodo, kaip reikia atlikti bandymus ir apdoroti jų rezultatus, kad, atliekant minimalų bandymų skaičių, būtų galima apibendrinti jų rezultatus ir gauti visos grupės panašių reiškinių dėsningumus. Panašumo teorija leidžia pakankamai tiksliai ištirti sudėtingus procesus, naudojant modelius (gerokai mažesnių matmenų ir dažnai gerokai paprastesnius už originalą), ne perdirbamą (kai kada nuodingą, sprogią ir degią bei brangią ir t. t.), o modelinę medžiagą (pvz., vandenį, orą ir t. t.). Visa tai leidžia supaprastinti ir atpiginti bandymus, greičiau įgyvendinti tyrimų rezultatus.

Reikia atkreipti dėmesį, kad, taikant panašumo teoriją, galimi tam tikri apribojimai. Pavyzdžiui, taikant panašumo teorijos metodus, negalima gauti daugiau informacijos, negu jos yra pradinėse lygtyse. Netaikant įprastinių matematinių metodų pradinėms lygtims integruoti, jų sprendinius galima gauti ir kitais panašumo teorijos metodais. Šie sprendiniai bus netikslūs, jeigu pradinės lygtys netiksliai aprašys tiriamojo proceso fizikinę esmę. Be to, modeliavimas, taikant apibendrintųjų kintamųjų metodą, visada susijęs su neretai gana sudėtingo, didelės apimties ir gaišlaus eksperimento atlikimu. Išvestos apibendrintos lygtys tinka tik tiems kintamųjų kitimo intervalams, kurie buvo naudojami atliekant eksperimentus.

Diferencialinių lygčių pertvarkymas, remiantis panašumo teorija. Panašumo teorija įgalina diferencialines lygtis išreikšti funkcine panašumo kriterijų tarpusavio priklausomybe. Todėl atliekami tokie veiksmai:

1) formuluojamas vienareikšmiškumo sąlygų panašumas, t. y. pasirenkamos panašumo konstantos arba mastelio daugikliai (paprastai sakoma, kad a_l, a_μ ir kt. yra pasirinkti);

2) kiekvienas diferencialinės lygties elementas padauginamas iš atitinkamų panašumo konstantų ir šios (kaip pastovūs dydžiai) iškeliami už diferencialo ženklo. Bet kurio laipsnio išvestinė užrašoma taip:

$$\frac{\partial^n u}{\partial x^n} = \frac{a_u}{a_l^n} \cdot \frac{\partial^n u}{\partial x^n}; \qquad (4.4)$$

3) sulyginami koeficientai, esantys prie vienodų dedamųjų pradinėse ir pertvarkytose lygtyse; taip pasiekiamas panašių procesų lygčių ir pradinių diferencialinių lygčių tapatumas. Gautos lygtys arba panašumo invariantai sujungia panašumo konstantas;

4) gautuose panašumo indikatoriuose panašumo konstantos pakeičiamos atitinkamais dydžių santykiais, išvedami panašumo kriterijai ir nustatoma jų tarpusavio priklausomybė (kriterijų lygtys).

4.2. Matmenų analizės metodas

Cheminės technologijos procesuose naudojamos medžiagos pasižymi įvairiomis fizikinėmis savybėmis (klampa, tankiu ir t. t.), o jų būklė ir proceso vyksmo sąlygos nusakomos įvairiais parametrais (temperatūra, slėgiu, greičiu ir t. t.), kurių matavimo vienetai yra skirtingi.

Naudojamo fizikinio dydžio išraiška pagrindiniais matavimo vienetų sistemos dydžiais vadinama šio dydžio matmeniu. Vienas ir tas pats fizikinis dydis įvairiose matavimo vienetų sistemose gali turėti skirtingus matmenis. Jeigu nežinoma pradinė lygtis, aprašanti tiriamąjį reiškinį (procesą), tai panašumo kriterijams formuoti gali būti panaudota matmenų analizė – mokslas apie racionalaus matavimo vienetų sistemos sudarymo metodus. Šiuo atveju dydžius suskirstome į pagrindinius ir išvestinius, nustatomus kaip pagrindinių funkcija. Išvestinis dydis išreiškiamas pagrindinių laipsniniu kompleksu, užrašomu matmenų formulės pavidalu, kadangi tik šiuo atveju vienavardžių dydžių santykis nepriklauso nuo pasirinktų vienetų. Ši sąlyga derinama su reikalavimu, kad gautos lygties kairiosios ir dešiniosios pusės matavimo vienetai būtų vienodi. Fizikinio dydžio A matmens išraiška yra tokia:

$$[A] = L^{l} \cdot M^{m} \cdot T^{\tau}; \qquad (4.5)$$

čia $[A]$ – nustatomo (išvestinio) dydžio matmens simbolis; L, M, T, ..., – išmatuojamų (pagrindinių) fizikinių dydžių (ilgio, masės, laiko ir kt.) simboliai; l, m, τ – sveikieji arba trupmeniniai, teigiami arba neigiami skaičiai, vadinami matmenų laipsnio rodikliu.

Pvz., pagreičio a matmens formulė užrašoma taip: $[a] = L \cdot T^{-2}$, jėgos – $[f] = L \cdot M \cdot T^{-2}$ ir t. t.

Pagrindinių fizikinių dydžių skaičių galima laisvai pasirinkti, bet praktiškai tai šiek tiek apriboja šių dydžių ir jų matavimo vienetų pasirinkimą.

Jeigu yra nustatyta, kokie tiriamojo proceso dydžiai turi įtakos ieškomam išvestiniam dydžiui, bet ryšio forma tarp jų nežinoma, tai galima sudaryti matmenų lygtį, kurios kairėje pusėje yra ieškomo dydžio simbolis su savo matmenų laipsnio rodikliais, o dešinėje – sandauga simbolių dydžių, nuo kurių priklauso ieškomas dydis su nežinomais matmenų laipsnio rodikliais. Reikia nustatyti atitinkamų matmenų laipsnio rodiklius, kurie parodys ryšį tarp fizikinių dydžių.

Matmenų analizės metodo pagrindą sudaro Bekinhemo π teorema: bemačių kompleksų skaičius lygus visų įvairiavardžių fizikinių dydžių, turinčių įtakos procesui, skaičiaus n ir pagrindinių dydžių skaičiaus m skirtumui.

Ši teorema susieja matmenų analizę su panašumo teorija, kadangi, išlaikant panašumą, bemačiai kompleksai, nustatyti naudojant π teoremą, yra panašumo kriterijai, t. y. panašumo kriterijų skaičius $k = n - m$. Taigi iš π teoremos išplaukia, kad bet kokie santykiai tarp tiriamąjį fizikinį reiškinį apibūdinančių ir matmenis turinčių dydžių (dydžių skaičius n), gali būti pateikti mažesnio skaičiaus bemačių kompleksų, sudarytų iš šių dydžių (kompleksų skaičius k), tarpusavio santykiu.

Matmenų analizės metodas nėra universalus, jį naudojant reikia žinoti skaičių kintamųjų, nuo kurių priklauso tiriamasis reiškinys arba procesas. Norint nustatyti tiriamajam reiškiniui įtakos turinčių kintamųjų skaičių n, reikia atlikti daug eksperimentų. Taip pat reikia atlikti eksperimentus, pagal kurių duomenis apskaičiuojami (4.5) lygties laipsnio rodikliai. Jeigu neįvertinsime bent vieno iš tiriamajam procesui įtakos turinčių dydžių, tai galime gauti klaidingą (duodančią didelių nukrypimų) galutinę skaičiavimo lygtį. Todėl matmenų analizės metodas, skirtingai nuo matmenų teorijos, taikomas ribotai.

4.3. Analitinis apibendrintų kintamųjų gavimo metodas

Toliau išdėstomi A. Cholmogorovo pasiūlyti panašumo teorijos pagrindai. Pagal ją tiriamajam reiškiniui aprašyti naudojami parametrai, kurių matmenis sudaro m nepriklausomų matavimo vienetų A_1, A_2, ..., A_m (pvz., ilgio vienetai L, masės M ir laiko arba trukmės T). Išvestiniai parametrų matavimo vienetai sudaromi iš pagrindinių pagal tokią priklausomybę:

$$Q = A_1^{p1} \cdot A_2^{p2} \cdot \ldots \cdot A_m^{pm}. \qquad (4.6)$$

Jų matmuo $[Q] = \left[A_1^{p1} \cdot A_2^{p2} \cdot \ldots \cdot A_m^{pm}\right]$ apibūdinamas skaitmeniniais laipsnio rodikliais p_1, p_2, ..., p_m. Kiekvienas dydis X, kurio matmuo $[X] = [Q]$, pateikiamas tokia forma: $X = x \cdot Q$ (čia x – skaitinė dydžio X vertė, kai jo matmuo išreiškiamas, naudojant pasirinktą pagrindinių dydžių A_1, A_2, ..., A_m sistemą).

Tarkim, tiriama grupė S reiškinių ir kiekvienas iš jų nusakomas, pasirenkant tam tikrus dydžius Y. Du tokie reiškiniai S_1 ir S_2 vadinami panašiais, jeigu reiškinį S_2 apibūdinančių dydžių Y_2 vertės apskaičiuojamos iš atitinkamų dydžių Y_1, apibūdinančių reiškinį S_1, verčių pagal lygtį

$$Y_2 = k_1^{p1} \cdot k_2^{p2} \cdot \ldots \cdot k_m^{pm} \cdot Y_1; \qquad (4.7)$$

čia k_1, k_2, ..., k_m – pastovūs panašumo koeficientai, o rodikliai p_1, p_2, ..., p_m nusakomi dydžio Y matmeniu:

$$[Y]=\left[A_1^{p1}\cdot A_2^{p2}\cdot\ldots\cdot A_m^{pm}\right]. \qquad (4.8)$$

Tariama, kad iš dydžių Y sistemos išskirta tam tikra dalis, sudaranti apibrėžtų parametrų sistemą X, kad kiekvieno Y bet kuri skaitinė vertė y būtų funkcija $y=f(X)$. Skaitinė parametrų X vertė x ir funkcijos išraiška lieka tokios pat esant bet kokiam pagrindinių matavimo vienetų A_1, A_2, ..., A_m deriniui. Tokiu atveju, pagrindinis panašumo teorijos principas gali būti suformuluotas taip: kad reiškiniai S_1 ir S_2 būtų panašūs, būtina ir pakanka, kad bet kurios nusakančių parametrų bematės kombinacijos

$$k = X_1^{q1}\cdot X_2^{q2}\cdot\ldots\cdot X_m^{qm} \qquad (4.9)$$

vertės reiškinių S_1 ir S_2 atitinkamuose taškuose būtų pastovios, t. y. $k_1=k_2$.

Kiekviena bematė k (4.9) lygties išraiška vadinama panašumo kriterijumi. Į taip apibrėžtą panašumo kriterijų patenka visi bemačiai apibrėžiantieji parametrai ir visi tokio tipo santykiai:

$$k = X_1/X_2; \qquad (4.10)$$

čia X_1 ir X_2 – to paties matmens apibrėžiantieji parametrai.

Naudojant bemačius parametrus ir (4.10) lygties tipo santykius, panašumui būtina lygybė $k_1=k_2$. Juos galima vadinti trivialiais (simpleksiniais). Naudojant panašumo kriterijus, (4.10) tipo k santykiai dažnai praleidžiami. Jeigu trivialios panašumo sąlygos $k_1=k_2$ neabejotinai tenkinamos, tai tarp netrivialių panašumo sąlygų yra tik $s=n-m_1$ nepriklausomų kriterijų. Čia n yra reiškinio $[X]$ skirtingus matmenis turinčių dydžių skaičius, tarp kurių m_1 – pagrindinių matmenų skaičius. Kadangi visada $m_1 \le m$, tai $s \le n-m$.

Jeigu reiškiniai tiriami naudojant diferencialines lygtis, tai apibrėžiantys arba nusakantys parametrai įeina į pradinių ir ribinių sąlygų dydžius arba į diferencialinių lygčių koeficientus. Pertvarkius lygtis bemate forma, jose pasilieka tik bemačiai koeficientai, kurie yra panašumo kriterijai.

Taigi išnagrinėtas analitinis apibendrintų kintamųjų – panašumo kriterijų nustatymo metodas susieja panašumo teoriją su matmenų analize ir nusako būtinas ir pakankamas bet kokio proceso, kuriam sukurtas matematinis aprašymas, apibendrintų kriterijų lygčių sudarymo sąlygas.

4.4. Hidrodinaminių procesų panašumas

Procesų panašumui įrodyti galima panaudoti ir Navjė ir Stokso lygtį vertikaliajai ašiai z:

$$\frac{\partial w_z}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \cdot \nabla^2 w_z .$$

Visus lygties narius padauginame iš atitinkamų panašumo konstantų a:

$$\frac{a_w}{a_\tau} \cdot \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \frac{a_w^2}{a_\ell} \cdot \left(w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) =$$

$$\frac{a_p}{a_\rho \cdot a_\ell} \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) + a_g \cdot (-g) + \frac{a_\nu \cdot a_w}{a_\ell^2} \cdot \nu \cdot \nabla^2 w_z .$$

Kad išliktų gautosios ir pradinės lygčių tapatumas, prie lygčių tų pačių narių esantys koeficientai turi būti lygūs:

$$\frac{a_w}{a_\tau} = \frac{a_w^2}{a_l} = \frac{a_p}{a_\rho \cdot a_\ell} = a_g = \frac{a_\nu \cdot a_w}{a_\ell^2} . \qquad (4.11)$$

(1) (2) (3) (4) (5)

(4.11) lygties konstantų kompleksus (1), (3), (4) ir (5) padaliję iš (2) komplekso, gauname atitinkamų jėgų ir inercijos jėgos santykius:

$$\frac{a_w \cdot a_\ell}{a_\tau \cdot a_w^2} = 1; \quad \frac{a_p \cdot a_\ell}{a_\rho \cdot a_\ell \cdot a_w^2} = 1; \quad \frac{a_g \cdot a_\ell}{a_w^2} = 1; \quad \frac{a_\nu \cdot a_w \cdot a_\ell}{a_w^2 \cdot a_\ell^2} = 1. \qquad (4.12)$$

(I) (II) (III) (IV)

Panagrinėsime (4.12) lygties (IV) santykį $a_\nu / (a_w \cdot a_l) = 1$.

Užrašę panašumo konstantas atitinkamų dydžių santykiu, gausime:

$$\frac{(w_1/w_2) \cdot (\ell_1/\ell_2)}{\nu_1/\nu_2} = 1, \text{ arba } \frac{w_1 \cdot \ell_1}{\nu_1} = \frac{w_2 \cdot \ell_2}{\nu_2} = idem ,$$

iš čia

$$w \cdot \ell / \nu = w \cdot \ell \cdot \rho / \mu = Re , \qquad (4.13)$$

t. y. jau žinomas matmens neturintis dydis – Reinoldso kriterijus. Jis apibūdina trinties ir inercijos jėgų santykį ir nusako judėjimo režimą visuose atitinkamuose panašių sistemų taškuose.

(4.12) lygties (I) santykis įvertina nenuostovųjį skysčio judėjimą:

$$\frac{a_\ell}{a_w \cdot a_\tau} = 1 \text{ arba } \frac{w_1 \cdot \tau_1}{\ell_1} = \frac{w_2 \cdot \tau_2}{\ell_2} = idem,$$

iš čia

$$w \cdot \tau / \ell = Ho . \qquad (4.14)$$

(4.14) lygtis yra panašumo kriterijus, apibūdinantis nenuostoviąją proceso būseną, ir vadinamas homochroniškumo kriterijumi *Ho*. Visuose atitinkamuose panašių sistemų (originalo ir modelio) taškuose homochroniškumo kriterijus turi tas pačias vertes, kai šiose sistemose skysčio judėjimas nenuostovus.

Iš (II) santykio gausime panašumo kriterijų, apibūdinantį hidrostatinio slėgio ir inercijos jėgų santykį panašiose sistemose:

$$\frac{a_p}{a_\rho \cdot a_w^2} = 1 , \text{ arba } \frac{p_1}{\rho_1 \cdot w_1^2} = \frac{p_2}{\rho_2 \cdot w_2^2} = idem.$$

Neturintis matmens santykis $p/(\rho \cdot w^2)$ vadinamas Eulerio kriterijumi. Sprendžiant daugelį techninių hidrodinamikos uždavinių, svarbu nustatyti ne absoliutųjį slėgį sistemoje, o slėgių skirtumą Δp tarp konkrečių taškų arba srauto skerspjūvių. Todėl Eulerio kriterijus paprastai atspindi hidrostatinio slėgio pokyčio įtaką skysčio judėjimui ir išreiškiamas lygtimi

$$Eu = \Delta p / \left(\rho \cdot w^2\right). \qquad (4.15)$$

(4.12) lygties (III) santykis apibūdina sunkio jėgos santykį su inercijos jėga:

$$a_g \cdot a_\ell / a_w^2 = 1 \quad \text{arba} \quad w_1^2 / \left(g_1 \cdot \ell_1\right) = w_2^2 / \left(g_2 \cdot \ell_2\right) = const.$$

Iš čia gauname matmens neturintį kompleksą, vadinamą Frudo panašumo kriterijumi, kuris atspindi sunkio jėgos įtaką skysčio judėjimui:

$$w^2 / \left(g \cdot l\right) = Fr . \qquad (4.16)$$

Bendruoju atveju klampiųjų skysčių judėjimą aprašančios Navjė ir Stokso lygties sprendimas gali būti pateiktas tokia kriterijų lygtimi, kuri hidrodinamikoje vadinama apibendrintąja (kriterijų) lygtimi:

$$f\left(Ho, Eu, Fr, Re\right) = 0 . \qquad (4.17)$$

Bet kokį klampiojo skysčio judėjimo uždavinį galima išspręsti, nustatant priklausomybę tarp (4.17) lygties panašumo kriterijų.

Visi (4.17) lygties kriterijai, išskyrus *Eu*, vadinami apibrėžiančiaisiais arba nusakančiaisiais, kadangi jie sudaryti iš dydžių, nusakančių tapatumo sąlygas. Praktiniams uždaviniams spręsti naudojant (4.17) lygtį, paprastai apskaičiuojamas Δp dydis, įrašytas į *Eu*. Šiuo atveju (4.17) lygtis išsprendžiama apibrėžiamo arba nusakomo *Eu* kriterijaus atžvilgiu:

$$Eu = f_1(Ho, Fr, Re). \tag{4.18}$$

Pvz., $$Eu = A \cdot Ho^q \cdot Fr^n \cdot Re^m. \tag{4.19}$$

A, q, n ir *m* vertės nustatomos eksperimentiškai.

Daugeliu atvejų (4.18) lygtis papildoma geometrinio panašumo simpleksu, atspindinčiu kanalo ilgio ir skersmens santykio (ℓ / d_{ekv}) įtaką.

Nuostoviojo judėjimo homochroniškumo kriterijus (4.17) lygtyje gali būti praleistas. Tada

$$f_2(Eu, Fr, Re) = 0. \tag{4.20}$$

Jeigu skysčio judėjimo greitį nustatyti sunku (pvz., natūralios konvekcijos atveju), naudojami vadinamieji išvestiniai arba modifikuoti panašumo kriterijai, išvesti iš pagrindinių kriterijų. Šiuose kriterijuose greitis, kaip sunkiai nustatomas dydis, pakeičiamas kitu lengviau analitiškai apskaičiuojamu arba eksperimentiškai nustatomu dydžiu, pvz., tankiu. Panašiai gali būti nustatomi ir kiti parametrai.

Pvz., vykstant natūraliai konvekcijai, atsirandančiai dėl tankių skirtumo, kurį sąlygoja temperatūrų skirtumas įvairiuose skysčio taškuose, sunku nustatyti konvekcinių srautų greičius. Frudo kriterijus atspindi sunkio jėgos veikimą, dėl kurio vyksta skysčio dalelių persislinkimas, tačiau į šį kriterijų įeina sunkiai nustatomas dydis *w*. Kad iš Frudo kriterijaus išraiškos $Fr = w^2/(g \cdot \ell)$ būtų pašalintas *w*, imamas dviejų kriterijų santykis:

$$Re^2/Fr = (w^2 \cdot \ell^2 \cdot \rho^2/\mu^2) \cdot (g \cdot \ell/w^2) = \ell^3 \cdot \rho^2 \cdot g/\mu^2.$$

Gautas matmens neturintis dydžių kompleksas yra išvestinis kriterijus, vadinamas Galilėjaus kriterijumi:

$$Ga = \ell^3 \cdot \rho^2 \cdot g/\mu^2. \tag{4.21}$$

Jeigu šį kriterijų padauginsime iš santykio $(\rho_0 - \rho)/\rho$ (čia ρ_0 ir ρ – srauto tankis skirtinguose taškuose), atspindinčio konvekcinių srautų atsiradimo priežastį, gausime naują išvestinį panašumo kriterijų – Archimedo kriterijų:

$$Ar = Ga \cdot (\rho_0 - \rho)/\rho = (\ell^3 \cdot \rho^2 \cdot g/\mu^2) \cdot ((\rho_0 - \rho)/\rho). \tag{4.22}$$

Panašiose sistemose, kuriose procesas vyksta esant natūraliai konvekcijai dėl sunkio jėgos veikimo, būtina, kad atitinkamuose sistemų taškuose *Ga* arba *Ar* kriterijai būtų lygūs.

Literatūroje aprašoma, kaip hidrodinaminio panašumo kriterijus galima gauti taikant analitinį metodą (žr. 4.3 skyrelį).

Minėtais dviem formaliai skirtingais metodais gaunamas vienodas skaičius tų pačių apibendrintų kintamųjų – hidrodinaminių procesų panašumo kriterijų, kuriais remiantis sudarytos hidrodinamikos uždaviniams spręsti naudojamos kriterijų lygtys.

Tas duoda pagrindą naudoti gana formalų, bet paprastesnį panašių diferencialinių lygčių pertvarkymo metodą, kurio esmė tokia: panašumo kriterijus nustatomas dalijant vieną lygties narį iš kito ir atmetant matematinių operacijų ženklus. Pvz., Navjė ir Stokso (3.56) lygties pertvarkymai atliekami taip:

$$\frac{\partial w_z}{\partial \tau} \sim \frac{w}{\tau}; \qquad \left(w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \sim \frac{w^2}{\ell};$$

$$\frac{\ell}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \sim \frac{p}{\rho \cdot \ell}; \qquad \nu \cdot \nabla^2 w_z \sim \frac{\nu \cdot w}{\ell^2}.$$

Iš inercijos jėgos padaliję visus likusius (3.56) lygties narius, gausime jau žinomus hidrodinaminio panašumo kriterijus: *Ho, Eu, Fr, Re.* Analogišku būdu galima gauti šilumos mainų ir masės mainų procesų panašumo kriterijus.

4.5. Matematinis modeliavimas

Tiriant fizikinius ir cheminius procesus vis plačiau taikomas matematinis modeliavimas. Matematinis modeliavimas – tai tiriamojo reiškinio (proceso) savybių ir charakteristikų nustatymas, sprendžiant procesą aprašančią lygčių sistemą – matematinį modelį. Modeliavimo metu reikia sudaryti patį (daugumos procesų) matematinį modelį. Todėl labai svarbu sudaryti tokį matematinį modelį, kuris geriau atspindėtų tiriamąjį procesą ir būtų paprastesnis bei suprantamesnis. Eksperimentas, kuris yra bet kokio tyrimo pagrindas, kartu suteikia matematiniam modeliavimui pradinius duomenis. Matematinis modeliavimas yra vienas iš fizikinio modeliavimo metodų ir su juo sudaro bendrą objektų tyrimo ir pažinimo sistemą.

Matematinis modeliavimas ypač svarbus ten, kur ne visai aiški tiriamojo proceso fizikinė esmė, nepažįstamas sąveikos mechanizmas ir negalima tiriamojo proceso aprašyti apibendrintosiomis lygtimis. Skaitmeninio eksperimento metu patikslinama tiriamojo proceso fizikinė esmė (proceso fizikinis modelis). Atliekant įvairius skaičiavimus, kaupiami faktai, kas leidžia atrinkti realiausius ir labiausiai tikėtinus variantus. Matematinis modeliavimas paspartina ir atpigina tyrimo ir projektavimo darbus.

Bendrą proceso matematinio modeliavimo (skaitmeninio eksperimento) schemą sudaro 8 nuosekliai vienas po kito einantys etapai.

1. Uždavinio formuluotė. Formuluotėje nusakomas sprendžiamo uždavinio tikslas ir sprendimo eiga. Tai vienas iš svarbiausių modeliavimo etapų, kadangi nėra bendrų taisyklių, kurios tiktų visais atvejais. Prieš sudarant už-

davinio sprendimo eigą, būtina pakankamai gerai išsiaiškinti to uždavinio esmę. Kuo aiškesnė bus tiriamojo proceso esmė, tuo tiksliau bus sudaromas jo fizikinis modelis.

2. Proceso teorinių pagrindų analizė. Šiame etape išsiaiškinama, kokie fundamentalūs dėsniai aprašo tiriamojo proceso esmę. Paprastai proceso teorinių pagrindų studijos atliekamos pagal įvairius publikuotus ir nepublikuotus šaltinius. Jeigu nepasiseka parinkti patenkinamos teorijos, galima sukurti hipotezes arba postulatus. Jų teisingumas turi būti patikrintas, lyginant pagal postulatus arba hipotezes sudaryto matematinio modelio skaičiavimo rezultatus su eksperimentiniais duomenimis.

Kai kuriais atvejais proceso fizikiniam modeliui sudaryti tikslinga taikyti procesų analogijos metodą, o po to eksperimentiškai patikrinti analogiją.

3. Proceso matematinio modelio sudarymas. Pagal antrame etape parinktą tiriamojo proceso fizikinį modelį sudaroma atitinkamų matematinių lygčių sistema – proceso matematinis modelis. Matematinio modelio sudarymas remiasi tyrimo objekto formaliu aprašymu lygčių sistemomis arba funkcinėmis priklausomybėmis tarp atskirų modelio parametrų. Matematiniame modelyje gali būti naudojamos diferencialinės arba baigtinės lygtys, neturinčios diferencijavimo operatoriaus.

Modeliai būna: determinuoti arba analitiniai, sudaryti remiantis tiriamojo proceso fizikine ir chemine prasme, t. y. mechanizmu, ir statistiniai arba empiriniai, užrašyti regresijos lygtimis, gautomis matematiškai apdorojant eksperimentų rezultatus. Determinuoti modeliai universalesni ir platesniame parametrų intervale adekvatūs.

Determinuotus modelius sudaro trys lygčių grupės:

1) medžiagų ir energijos balanso lygtys. Jos leidžia nustatyti masės ir šilumos srautus, sistemos fizikinių cheminių savybių (klampos, savitosios šilumos ir kt.) kitimą, kintant srautų temperatūrai ir sudėčiai;
2) būsenos lygtys (fazių pusiausvyros ir kt.);
3) kinetinės lygtys. Šiai grupei priskiriamos šilumos, masės ir impulso pernašos, cheminės kinetikos ir t. t. lygtys.

Šiame etape taip pat nagrinėjama galimybė supaprastinti lygtis, pašalinant iš jų tuos narius, kurie sprendžiant uždavinį beveik nesikeičia ir mažai turi įtakos tiriamajam procesui. Taip kartais galima iš matematinio aprašymo pašalinti atskiras lygtis. Pvz., sudarant šilumos balanso lygtis, paaiškėjo, kad tiriamame koncentracijų kitimo intervale mišinio savitoji šiluma kinta 1...2 % nuo nominalios vertės, o į tai daugeliu atvejų galima nekreipti dėmesio. Taigi prieš įtraukiant lygtį į tiriamojo proceso matematinį modelį, reikia įvertinti į lygtį įeinančių kintamųjų įtaką uždavinio sprendimo rezultatams ir pagal galimybę mažą įtaką darančius kintamuosius pakeisti pastoviomis jų vidutinėmis vertėmis.

4. Matematinio modelio algoritmizacija. Šiame modeliavimo etape parenkamas sudaryto matematinio modelio sprendimo metodas ir sukuriamas jo sprendimo algoritmas. Kai procesai gana paprasti, juos aprašančią lygčių sistemą galima išspręsti analitiškai. Kada matematinį modelį sudaro sudėtinga diferencialinių lygčių sistema, labai svarbu parinkti efektyvų algoritmą. Parenkant algoritmą reikia atsižvelgti į daug veiksnių, pvz., ar tai paprastos diferencialinės lygtys, ar dalinių išvestinių lygtys, kiek yra kintamųjų ir kt. Šiame etape reikia parinkti bendrą uždavinio sprendimo metodiką ir nustatyti visumą kriterijų, kuriuos turi tenkinti parašyta modelio lygčių sistema. Be to, šiame etape reikia atlikti (matematinę ir fizinę) analizę, kuri turi patvirtinti, kad modelio sprendimas egzistuoja ir kad jis yra vienintelis.

Sudarius išsamų matematinio modelio aprašymą, parenkamas priimtiniausias tuo atveju sprendimo metodas, patikslinamos visos jo detalės, užrašomas algoritmas. Pagal algoritmą, naudojant vieną iš algoritminių kalbų (Pascal, Fortran, Basic ir kt.), parašoma kompiuterio programa.

5. Modelio parametrinis identifikavimas. Matematinio modelio parametrais vadinami koeficientai, kurie įvertina vienus ar kitus objekto–originalo savitumus ir apibūdina tiriamosios sistemos savybes, skiriančias jį nuo kitų panašios klasės originalų. Todėl kuo daugiau modelis turi parametrų, tuo nuosekliau ir tiksliau pasiseka aprašyti ir apibūdinti tiriamąjį originalą. Tačiau daugelio parametrų matematiniai modeliai turi ir esminių trūkumų – pirmiausia tokius modelius sunku apdoroti, jie jautrūs eksperimento metu gautoms paklaidoms. Gali susidaryti situacija, kada dėl nepakankamo eksperimento tikslumo, prarandama modelio fizikinė prasmė, nors apskritai modelio ir eksperimentų duomenys gana gerai sutampa. Taip atsitinka todėl, kad įvairių parametrų dydžių paklaidos tarpusavyje kompensuojasi. Tokiu atveju originalo kokybinis aprašymas nurodytuose kintamųjų intervaluose išlieka tinkamas, bet modelio fizikinė prasmė iškraipoma ir jo parametrai įgauna tariamųjų parametrų, skirtų modelio ir eksperimento duomenims sutapdinti, prasmę. Dažnai kai kurie modelio parametrai būna nežinomi ir jų vertę galima nustatyti tik atlikus papildomus eksperimentus, t. y. modelio parametrus būtina identifikuoti.

Modelio parametrų identifikavimo procedūra gana formalizuota. Matematinių modelių parametrų identifikavimo metodai aprašyti specialioje literatūroje.

6. Matematinio modelio adekvatumo patikrinimas. Modelių kokybės kriterijus yra jų adekvatumas arba naudojantis modeliu prognozuojamų duomenų artumas eksperimento duomenims. Matematinio modelio adekvatumui realiam procesui patikrinti būtina palyginti eksperimento metu nustatomus dydžius su tų dydžių prognozėmis pagal modelį nustatant proceso parametrus. Paprastai lyginama naudojant kai kurias statistikos hipotezes.

7. Proceso modeliavimas. Šiame etape proceso matematinis modelis skaičiuojamas asmeniniu kompiuteriu, keičiant proceso parametrus tyrimuose naudojamame intervale.

8. Gautos informacijos analizė. Tai baigiamasis uždavinio sprendimo etapas. Jo esmė – matematinio modelio sprendimo rezultatų patikrinimas ir tyrimas. Kiekvienam iš anksto neprognozuojamam sprendiniui būtina sukurti racionalų paaiškinimą, kad būtų išvengta klaidų, kurių gali atsirasti sprendžiant uždavinį.

Kiekviename realiame procese dėl įvairių priežasčių parametrų vertės kinta gana plačiame intervale. Todėl būtina atlikti sumodeliuoto proceso funkcionavimo analizę, keičiant įvairius parametrus. Tokia analize siekiama trijų pagrindinių tikslų:

1) ištirti modelio elgseną, keičiant parametrus;
2) ištirti, ar tiriamasis modelis veikia keičiant parametrus, ir atitinkamai nustatyti jo veiksmo ribas;
3) sukoreguoti modelį turint tikslą praplėsti modelio gebos dirbti ribas ir pagerinti modelio charakteristikas.

5 dalis

SRAUTŲ HIDRODINAMINĖ STRUKTŪRA

Nagrinėjant skysčio judėjimo sraute režimus (3.1.2 skyrius), buvo parodyta, kad greitis srauto skerspjūvyje kinta nuo nulio prie sienelių iki didžiausio srauto centre. Todėl srauto centre judančios dalelės aparate būna trumpiau nei dalelės, judančios prie kanalo sienelių. Dalelė šiuo atveju suprantama kaip molekulių, judančių vienoda trajektorija, visuma. Turbulentinio tekėjimo atveju dėl pulsacijos atskirų dalelių judėjimo greitis kanalo skerspjūvyje pasiskirsto tolygiau, tačiau ryškiai skiriasi išilgai kanalo. Jų judėjimo kryptis gali sutapti arba nesutapti su visos dalelių masės judėjimo kryptimi, o atskiros srauto dalelės kanale arba aparate gali būti skirtingą laiką.

5.1. Srauto dalelių judėjimas ir buvimo cheminiuose aparatuose trukmė

Dalelių judėjimas cheminiuose aparatuose daug sudėtingesnis negu vamzdynuose (5.1 pav.).

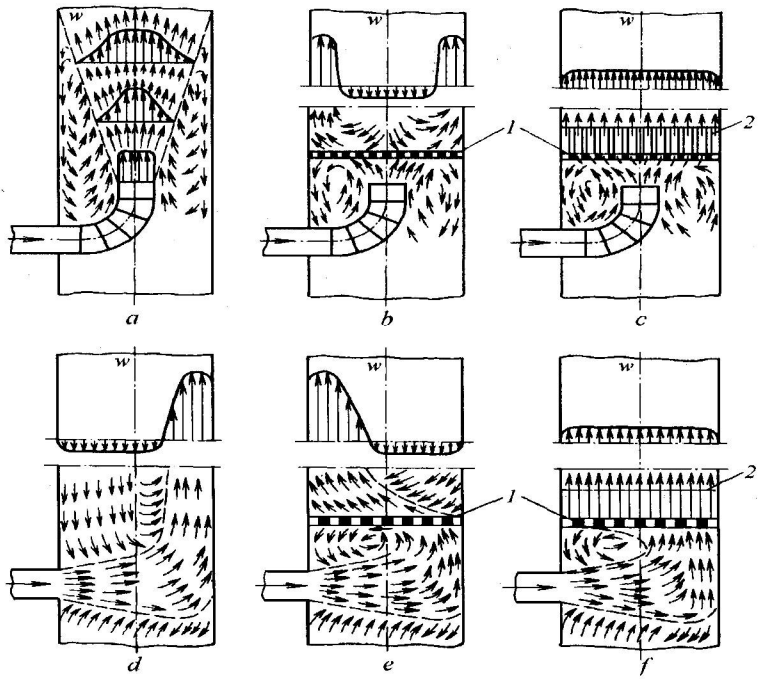
Dalelių judėjimo aparatuose trajektorijos yra sudėtingos kreivės. Kai kada atskiros dalelės juda net ir tokia kryptimi, kuri yra priešinga srauto judėjimo krypčiai. Todėl vienos dalelės aparate būna trumpiau, kitos ilgiau, o dalelių, patekusių į užsistovėjimo zoną, buvimo joje trukmė yra daug ilgesnė už vidutinę srauto buvimo aparate trukmę. Dažnai aparatuose susidaro aptekantysis srautas, kuris vadinamas aplenkimo (angl. *bypass*) srautu. Pvz., laistomajame skruberyje dalis dujų srauto prateka tarp žemyn judančių skysčio lašelių nesiliesdama su jais. Gali atrodyti, kad greičiausiai aparatą pratekančios (aplenkimo srauto) dalelės jame būna per trumpai.

Planuotam pasikeitimui pasiekti, dalelės, patekusios į užsistovėjimo zoną, joje turi būti ilgiau, nei nusistovi šilumos ir masės mainų pusiausvyra, todėl šios zonos naudojamos neefektyviai. Srauto dalelių buvimo aparate trukmei sulyginti srauto skerspjūvyje naudojamos įvairios priemonės (5.1 pav., *c, f*), kurios ne visada duoda laukiamus rezultatus.

Visų skysčio srauto dalelių vidutinė buvimo aparate trukmė $\bar{\tau}$ apskaičiuojama naudojant tokį santykį:

$$\bar{\tau} = V_a / V_s \; ; \qquad (5.1)$$

čia V_a – aparato darbo zonos tūris, m^3; V_s – srauto tūrio debitas, m^3/s.



5.1 pav. Dujų srauto pasiskirstymo schemos, dujoms įtekant į aparatą ir dujų greičio epiūros aparatų skerspjūviuose:
a, b, c – esant centriniam srauto tiekimui, *d, e, f* – esant šoniniam srauto tiekimui, *a, d* – be paskirstymo tinklelio, *b, e* – su paskirstymo tinkleliu (*1*), *c, f* – su paskirstymo tinkleliu (*1*) ir su papildomu įtaisu srautui ištiesinti (*2*)

Kadangi greičio laukas dažniausiai apibrėžia temperatūrų ir koncentracijų laukus, tai nuo hidrodinaminės srautų struktūros aparate priklauso procesų varos jėga, o kartu ir daugelio cheminės technologijos procesų greitis. Hidrodinaminę srautų struktūrą įvertinti labai svarbu skaičiuojant pramoninius aparatus ir juos modeliuojant, kadangi net ir nedideli pramoninių aparatų konstrukcijos, o kai kada ir jo dydžio pokyčiai, lyginant su modeliu, kuris buvo naudojamas procesui tirti, gali esmingai pakeisti hidrodinaminę srauto struktū-

rą. O tai savo ruožtu gali pastebimai paveikti (dažniausiai sumažinti) tiriamajame aparate atliekamo proceso efektyvumą.

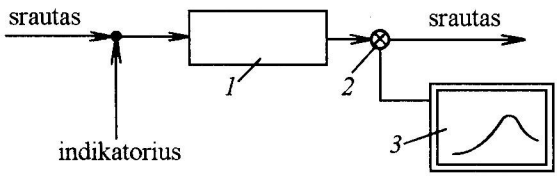
Daugiausia informacijos apie srauto hidrodinaminę struktūrą galima gauti, jeigu žinomas momentinis srauto greitis bet kuriame aparato arba jo modelio taške, t. y. jeigu žinomas srauto greičių laukas. Jį nustatyti labai sunku, o praktiškai visai negalima. Panašius eksperimentus dažnai atlikti neracionalu, kadangi sunku apdoroti šitaip surinktą informaciją apie srauto hidrodinaminę struktūrą.

Netolygias greičio vertes sraute galima nustatyti netiesioginiu būdu, tiriant skysčio dalelių pasiskirstymą pagal jų buvimo aparate trukmę. Taip galima nustatyti, kuri srauto dalis aparate būna vienokį ar kitokį laiką. Reikia pasakyti, kad, esant vienodai visų dalelių vidutinei buvimo trukmei, apskaičiuotai pagal (5.1) lygtį, srautų hidrodinaminė struktūra, o kartu ir greičių laukas gali skirtis.

Turbulentiniam srauto judėjimui yra būdingos atsitiktinės momentinės greičių vertės įvairiuose aparato taškuose, o kartu ir atsitiktinės srauto dalelių trajektorijos. Išmatuoti momentinius greičius arba registruoti dalelių judėjimo trajektorijas techniškai sunkus ir darbo imlus uždavinys. Nustatyta, kad yra ryšys tarp dalelių judėjimo greičio ir trajektorijos bei judėjimo greičio ir dalelių buvimo aparate trukmės, kurią išmatuoti gerokai paprasčiau. Visą informaciją apie srauto judėjimo aparate pobūdį suteikia srauto dalelių pasiskirstymo pagal buvimo aparate trukmę funkcija. Dalelių buvimo trukmės pasiskirstymo funkcija yra neišsami judėjimo charakteristika, nors ir pakankama aparato darbui integraliai įvertinti tais atvejais, kai dalelių pasikeitimo laipsnis priklauso nuo jų buvimo aparate trukmės. Eksperimentiškai nustatytos dalelių buvimo trukmės pasiskirstymo funkcijos gali būti naudojamos srautų struktūros hidrodinaminio modelio parametrams nustatyti ir jo adekvatumui tikrinti.

Srauto dalelės buvimo aparate trukmei matuoti reikia ją pažymėti taip, kad tai leistų registruoti dalelių įtekėjimo į aparatą ir ištekėjimo iš jo trukmę ir sudaryti koncentracijos ištekančiame sraute kitimo kreivę. Ši kreivė vadinama ištekėjimo arba atgarsio kreive.

Atgarsio funkcijai nustatyti naudojamo aparato principinė schema pavaizduota 5.2 paveiksle.



5.2 pav. Atgarsio funkcijų nustatymo schema:
1 – aparatas, *2* – koncentracijos matuoklis, *3* – grafikų braižymo aparatas

Taikant vieną iš metodų, pradiniu momentu, kuris laikomas proceso pradžia τ, į įtekantį srautą greitai (teoriškai akimirksniu) įmaišoma indikatoriaus, arba trasiklio. Taikant kitą metodiką, indikatorius įmaišomas pakopiniu būdu, t. y. tam tikru momentu τ indikatoriaus koncentracija šuoliškai padidėja iki C_I ir tokia išlieka ilgai. Kaip indikatorių galima naudoti medžiagą, kurios kiekį skystyje nesunku nustatyti ir kuri nereaguoja su skysčiu ir aparato metalu (pvz., į vandenį galima įmaišyti dažų, neorganinių druskų arba radioaktyviųjų izotopų tirpalo ir kt.). Indikatoriaus turi būti nedaug, kad nepasikeistų srauto pobūdis. Po to matuojama indikatoriaus koncentracija ištekančiame sraute C, kaip laiko τ funkcija, t. y. atgarsis į įtekėjimo sudirginimą, ir gaunamos ištekėjimo, arba atgarsio, kreivės, kurios dažnai vadinamos C kreivėmis.

Žinant C kreives, galima nustatyti, kiek skysčio įteka į aparatą ir kokia jo dalis iš jo išteka per nurodytą trukmę.

Priklausomai nuo indikatoriaus įmaišymo būdo gaunama arba diferencinė pasiskirstymo funkcija $C(\tau)$, kai indikatorius įmaišomas impulsiniu būdu, arba integralinė pasiskirstymo funkcija $F(\tau)$, kai indikatorius įmaišomas pakopiniu būdu. Iš gautos atgarsio funkcijos daroma išvada apie srautų struktūrą aparate.

Tiriamajame aparate vykstančio proceso mechanizmą paaiškinti sunku, kadangi realus greičių laukas jame nežinomas, t. y. šiuo atveju aparatas nagrinėjamas kaip „juodoji dėžė". Kartu toks srautų aparatuose struktūros tyrimo metodas yra gana paprastas, supaprastėja kiekybinis eksperimentinių duomenų apdorojimas, kadangi gaunama vieno kintamojo – trukmės funkcija. Be to, informacija apie buvimo trukmės pasiskirstymą dažnai duoda pagrindą įvertinti srautų struktūrą realiuose aparatuose, t. y. šiek tiek peršviesti „juodąją dėžę".

Įmaišomą indikatoriaus kiekį į aparatą tiekiamame nenutrūkstamame sraute pažymime M_0, o indikatoriaus koncentraciją iš aparato ištekančiame sraute – c. Jo pradinė koncentracija bus c_0. Idealaus sumaišymo aparate ji apskaičiuojama taip: $c_0 = M_0/V_a$.

Kad modelinio srauto tyrimo rezultatus galima būtų taikyti kitiems panašiems tyrimams, imame bemačius arba santykinius parametrus: santykinę trukmę $\theta = \tau / \bar{\tau}$ ir santykinę koncentraciją $C = c/c_0$.

Pasirenkame bet kokį laiko momentą τ. Per be galo mažą trukmės intervalą $d\tau$ iš aparato ištekės skysčio kiekis $V_s \cdot d\tau$, o su juo taip pat ištekės indikatoriaus kiekis dM:

$$dM = c \cdot V_s \cdot d\tau \,. \qquad (5.2)$$

Bematėse koordinatėse indikatoriaus kiekis

$$dM = c_0 \cdot C \cdot V_s \cdot d(\theta \cdot \bar{\tau}) = c_0 \cdot C \cdot V_s \cdot \bar{\tau} \cdot d\theta = \\ = \frac{M_0}{V_a} \cdot C \cdot V_s \cdot \frac{V_a}{V_s} \cdot dV_s = M_0 \cdot C \cdot d\theta \qquad (5.3)$$

arba $dM/M_0 = C \cdot d\theta$. (5.3a)

Dydis $C \cdot d\theta$ parodo pradinio įmaišyto indikatoriaus kiekio dalį, kuri išteka iš aparato per trukmę $d\theta$.

Pagal atsitiktinio dydžio tikimybės tankio apibrėžimą, tikimybė, kad atsitiktinis dydis U bus lygus kokiai nors vertei iš intervalo nuo u iki $(u + du)$, lygi tikimybės tankiui, arba to dydžio diferencialinei pasiskirstymo funkcijai:

$$p(u \le U < u + du) = f(u) \cdot du ;$$

čia p – tikimybės simbolis; U – atsitiktinio dydis, galintis įgauti įvairias vertes; u – konkreti U vertė.

Taigi bedimensė indikatoriaus koncentracija C lygi bedimensės trukmės tikimybės tankiui θ.

Jeigu indikatorius įmaišomas pakopiniu būdu, gauname vadinamąją F atgarsio funkciją, t. y. integralinę pasiskirstymo funkciją:

$$F(\theta) = \int_0^{\theta} C[\theta] \cdot d\theta. \qquad (5.4)$$

Kai $\theta < 0$, $C(\theta) = 0$, tai tikimybė, kad dalelės iš aparato ištekės anksčiau, negu į jį įtekės, lygi nuliui. Suintegravus kairiąją (5.3) lygties pusę intervale nuo 0 iki M_0, o dešiniąją nuo 0 iki ∞, gausime:

$$\int_0^{M_0} dM = M_0 \cdot \int_0^{\infty} C(\theta) \cdot d\theta = M_0 ,$$

arba $\int_0^{\infty} C(\theta) \cdot d\theta = 1$, t. y. tikimybė, kad dalelė, įtekėjusi į aparatą, kada nors iš jo ištekės, lygi vienetui.

Atsitiktinių dydžių pagrindinės charakteristikos yra matematinė viltis ir dispersija. Matematinę viltį nusako atsitiktinio dydžio vidutinė vertė. Dalelės buvimo aparate trukmės matematinė viltis apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$\bar{\theta} = \int_0^{\infty} \theta \cdot C(\theta) \cdot d\theta , \qquad (5.5)$$

arba natūralioje koordinačių sistemoje

$$\bar{\tau} = \int_0^\infty \tau \cdot c(\tau) \cdot d\tau \Big/ \int_0^\infty c(\tau) \cdot d\tau . \qquad (5.6)$$

Pagal (5.1), (5.5) ir (5.6) lygtis galima apskaičiuoti skysčio debitą V_s, kai žinomas aparato tūris V_a, arba atvirkščiai, žinant debitą V_s, galima apskaičiuoti nežinomą skysčio tūrį aparato darbo zonoje V_a.

Buvimo trukmės dispersiją σ^2 galima panaudoti analizuojant srauto struktūrą. Ji apibūdina atskirų matavimo rezultatų vidutinę kvadratinę sklaidą apie vidutinę vertę. Dispersija apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$\sigma^2(\theta) = \int_0^\infty (\theta - 1)^2 \cdot C(\theta) \cdot d\theta , \qquad (5.7)$$

arba natūralioje koordinačių sistemoje

$$\sigma^2(\tau) = \int_0^\infty \tau^2 \cdot c(\tau) \cdot d\tau \Big/ \bar{\tau}^2 \cdot \int_0^\infty c(\tau) \cdot d\tau - 1 .$$

Reikia pasakyti, kad, kuo didesnė dalelės buvimo aparate trukmės sklaida, tuo intensyvesnis išilginis skysčio maišymasis.

5.2. Idealizuoti srautų hidrodinaminės struktūros modeliai

Pagal dalelių buvimo aparate trukmės pasiskirstymo funkciją idealizuotus srautų matematinius modelius skirstome į idealiojo išstūmimo ir idealiojo sumaišymo modelius. Vienintelis šių modelių parametras yra vidutinė buvimo trukmė $\bar{\tau}$.

Idealaus išstūmimo modelis (IIM). Idealiojo išstūmimo aparate srauto dalelės juda vienodu greičiu lygiagrečiai vienos su kitomis; skersinio (srauto skerspjūvyje) ir išilginio (pagal srauto ilgį) srauto dalelių maišymosi nėra. Todėl visų dalelių buvimo aparate trukmė yra vienoda ir lygi vidutinei buvimo trukmei $\bar{\tau}$, apskaičiuojamai pagal (5.1) lygtį.

Matematiškai IIM aprašomas indikatoriaus balanso lygtimi, sudaryta aparatui arba jo elementui:

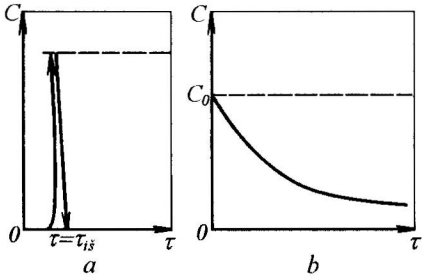
$$V_s \cdot \delta c \cdot \delta\tau = -F \cdot \delta x \cdot \delta c ;$$

čia F – aparato skerspjūvio plotas, m^2; x – srauto kelias, m. Ženklas δ reiškia be galo mažą padidėjimą.

Arba $$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\frac{V_s \cdot \partial c}{F \cdot \partial x} = -w \cdot \frac{\partial c}{\partial x} ; \qquad (5.8)$$

čia w – vidutinis skysčio judėjimo greitis, m/s.

5.3 pav., *a*, pavaizduotos atgarsio kreivės idealiojo išstūmimo aparate, kai indikatorius įmaišomas impulsais. Pradiniu momentu $\tau = 0$ indikatorius buvo įmaišytas į įtekantį srautą, o ištekančiame sraute iki momento $\tau = \tau_{iš}$ indikatoriaus nerasta.



5.3 pav. Atgarsio kreivės, kai indikatorius impulsais tiekiamas į idealiojo išstūmimo (*a*) arba idealiojo sumaišymo (*b*) aparatą

Po tam tikros trukmės $\tau_{iš}$ indikatoriaus koncentracija ištekančiame sraute akimirksniu padidėja iki koncentracijos, nustatytos „nuliniu" momentu, o paskui staigiai sumažėja iki nulio. Taigi idealiojo išstūmimo aparate indikatorius prateka ploniausiais sluoksniais. Bet koks nukrypimas nuo idealiojo išstūmimo srauto rodo maišymąsi atskirame skerspjūvyje arba grįžtamąjį maišymąsi. Trukmė $\tau_{iš}$ rodo vidutinę dalelių buvimo idealiojo išstūmimo aparate trukmę.

Idealiojo išstūmimo modeliams artimiausi ilgų vamzdžių aparatai arba nedidelio skersmens, bet gana aukšti cilindriniai aparatai su grūdine įkrova (sorbentu, katalizatoriumi ir t. t.).

Idealiojo sumaišymo modelis (ISM). Pagal ISM bet koks įtekančio srauto koncentracijos pasikeitimas akimirksniu pasiskirsto visame aparato tūryje. Jeigu į aparatą, kuriame srautų struktūra atitinka ISM (pvz., aparatą su maišikliu) impulsiniu būdu tieksime indikatorių (dažiklį), tai visas aparato tūris akimirksniu tolygiai nusidažys; pradinė koncentracija – c_0. Po to koncentracija pradės mažėti, kadangi indikatorius yra išnešamas iš aparato, o į aparatą įtekantis srautas jo daugiau jau nebeįneša. Tačiau bet kuriuo laiko momentu indikatoriaus koncentracija visuose aparato taškuose ir ištekančiame sraute bus vienodos. Taigi į idealaus sumaišymo aparatus įtekančiuose srautuose indikatoriaus koncentracija kinta šuoliškai (akimirksniu) nuo koncentracijos, įtekant į aparatą (c_0), iki momentinės koncentracijos (c), kuri lygi koncentracijai ištekančiame sraute. Srauto dalelių buvimo idealiojo sumaišymo aparate trukmė pasiskirsto netolygiai: kai kurios srauto dalelės (kai vyksta maišymas) greitai patenka į aparato sritis, artimas srautų ištekėjimo vietai, ir iš jų išteka, o kai kurios dalelės ilgam užsilaiko aparate.

Atgarsio kreivės idealaus sumaišymo aparatuose, kai indikatorius įmaišomas akimirksniu, pavaizduotos 5.3 paveiksle, *b*.

Matematiškai ISM aprašomas indikatoriaus balanso lygtimi. Iš aparato per laisvai pasirinktą trukmę $d\tau$ ištekantis indikatoriaus kiekis lygus $c \cdot V_s \cdot d\tau$. Indikatoriaus koncentracija aparate sumažėja dydžiu dc, o indikatoriaus kiekis – dydžiu $V_a \cdot dc$, t. y.

$$-V_a \cdot dc = c \cdot V_s \cdot d\tau .$$

Iš čia gauname: $dc/c = -V_s \cdot d\tau / V_a$,

o įvertinus (5.1) lygtį, $dc/c = -d\tau / \bar{\tau}$. (5.9)

Šios lygties kairiąją pusę suintegravę intervale nuo c_0 (kai $\tau = 0$) iki c (laisvai pasirinktas laiko momentas τ), o dešiniąją – nuo 0 iki τ, gauname:

$$\int_0^c dc/c = -(1/\bar{\tau}) \cdot \int_0^\tau d\tau .$$

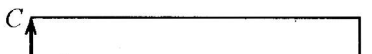
Pertvarkę gauname:

$$ln(c/c_0) = -\tau/\bar{\tau} = -\theta, \text{ arba} \quad c = e^{-\theta}. \tag{5.10}$$

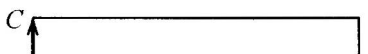
Integralinę atgarsio kreivę galima gauti ir integruojant (5.10) lygtį bei įvertinant (5.3a) priklausomybę:

$$F(\theta) = \int_0^\theta c \cdot d\theta = \int_0^\tau e^{-\theta} \cdot d\theta = 1 - e^{-\theta}. \tag{5.11}$$

Idealiojo sumaišymo aparatams yra artimi intensyviojo maišymo aparatai arba aparatai su pseudoverdančiuoju sluoksniu (džiovyklos, adsorberiai).



5.4 pav. Indikatoriaus koncentracijos sraute kitimas pagal aparato ilgį idealiojo išstūmimo (*1*) ir idealiojo sumaišymo (*2*) reaktoriuose



5.5 pav. Atgarsio kreivė, esant impulsiniam indikatoriaus įmaišymui (tarpinio tipo srauto struktūros modelis)

Kiekvienam idealiajam srautui būdingas ribinis tolygumas: IIM – greičių ir buvimo trukmės tolygumas, o ISM – koncentracijų bei temperatūrų tolygumas pagal visą aparato tūrį. Buvimo trukmės tolygumas padeda iki galo įvykti masės ir energijos pernašos procesui.

5.4 paveiksle parodyta, kaip keičiasi komponentų koncentracija išilgai aparatų, esant vienodoms komponento koncentracijoms srautams įtekant ir ištekant iš jų. Tai gali būti tik tuomet, kai ISM tūris didesnis už IIM tūrį. Iš 5.4 pav. matyti, kad koncentracija IIM didesnė negu ISM. Vadinasi, masės pernašos proceso varos jėga IIM bus didesnė.

Pastaba. Šiame poskyryje nagrinėti supaprastinti IIM ir ISM modeliai vadinami idealiaisiais srautais.

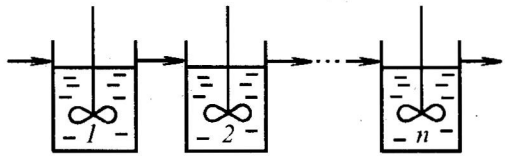
5.3. Realiųjų srautų struktūros hidrodinaminiai modeliai

Labai dažnai pagal hidrodinaminę struktūrą srautai pramoniniuose aparatuose neatitinka nei idealiojo sumaišymo, nei idealiojo išstūmimo modelio. Tokius srautus priskiriame prie tarpinio tipo modelių. Tarpinio tipo aparatų atgarsio funkcija gali esmingai skirtis nuo IIM ir ISM atgarsio kreivių (5.5 pav.). Impulsiniu būdu įmaišyto indikatoriaus ištekančiame sraute iki tam tikro momento neaptinkama. Pasiekus momentą τ_1, ištekantį srautą pasiekia greičiausios dalelės ir jame pasirodo indikatorius. Koncentracija didėja iki momento τ_2, o paskui pradeda mažėti, kadangi pagrindinė srauto masė pratekėjo ir išteka tik tos indikatoriaus dalys, kurios pateko į užsistovėjimo arba cirkuliacijos zonas. Šios indikatoriaus dalys teka ilgai.

Idealizuotiems modeliams procesų greičių ir atitinkamų aparatų matmenų skaičiavimo metodika, kai žinomi kinetiniai koeficientai, yra plačiai naudojama. Kur kas sunkiau aprašyti ir įvertinti realų temperatūros arba koncentracijų lauką, skaičiuojant tarpinio tipo aparatus. Šiuose aparatuose atsiranda temperatūrų arba koncentracijų gradientas pagal aparato ilgį, kadangi grįžtamojo srauto dalelių maišymasis yra neekvivalentinis idealiam maišymuisi.

Tarp tarpinių modelių labiausiai yra paplitę narveliniai ir vieno parametro difuziniai modeliai.

Narvelinis modelis. Realių aparatų narvelinis modelis schemiškai vaizduoja grandinę iš n nuosekliai sujungtų vienodų idealiojo sumaišymo aparatų (5.6 pav.).



5.6 pav. Narvelinio modelio srautų struktūros schema

Visų narvelių tūrių suma prilyginama realaus aparato tūriui. Todėl vieno narvelio tūris (kai jų tūriai vienodi) $V_i = V_a/n$. Tiriamąjį modelį apibūdina n narvelių grandinėje. Matematinį narvelinio modelio aprašymą sudaro n tiesinių pirmojo laipsnio diferencialinių lygčių sistema:

$$(dc_i/d\tau) = (n/\bar{\tau})\cdot(c_{i-1} - c_i), \qquad i = 1, 2, ..., n. \tag{5.12}$$

Diferencialinė buvimo aparate trukmės pasiskirstymo funkcija [atgarsio kreivė $c(\theta)$] užrašoma lygtimi:

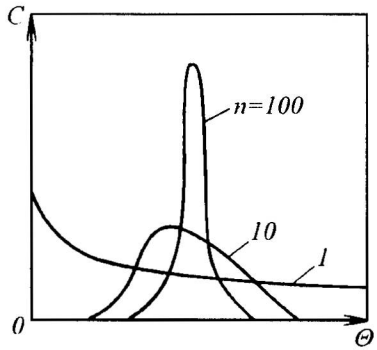
$$c(\theta) = n^n \cdot \theta^{n-1} \cdot e^{-n\cdot\theta}/(n-1)! \tag{5.13}$$

5.7 pav. pavaizduotas šios funkcijos grafikas, esant įvairioms n vertėms. Kai $n \to \infty$, narvelinis modelis tampa IIM, o kai $n = 1$, modelis virsta ISM, o (5.13) lygtis tampa (5.10) lygtimi. Taigi IIM ir ISM yra ribiniai narvelinio modelio atvejai.

Iš (5.13) lygties galima išvesti paprastą priklausomybę buvimo trukmės dispersijai apskaičiuoti:

$$\sigma^2(\theta) = 1/n. \tag{5.14}$$

Pagal šią lygtį patogu apskaičiuoti narvelių skaičių.



5.7 pav. Narvelinio modelio atgarsio kreivės, esant impulsiniam indikatoriaus įmaišymui

Difuzinis vieno parametro modelis. Tai idealiojo išstūmimo modelis, tik apsunkintas grįžtamuoju maišymusi, kurio buvimas aprašomas formaliuoju difuzijos dėsniu. Prie (5.8) lygties pridėję difuziją įvertinantį narį, gauname tokią lygtį:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -w \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \qquad (5.15)$$

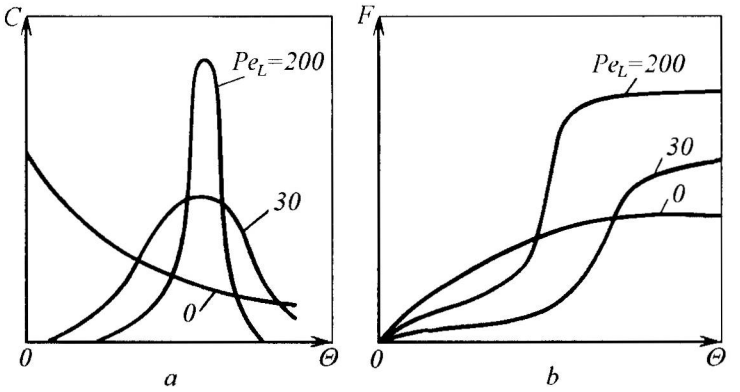
Antrasis lygties dešiniosios pusės narys $D_L \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ įvertina turbulentinę difuziją arba maišymąsi. D_L – išilginės difuzijos koeficientas, įvertinantis molekulinę ir turbulentinę difuziją, taip pat greičių lauko netolygumą. Praktiniuose uždaviniuose D_L paprastai yra empirinis parametras ir laikomas pastoviu per visą aparato ilgį.

Taigi vienintelis difuzinio modelio parametras yra išilginės difuzijos arba išilginio maišymosi koeficientas D_L. Tačiau, esant tai pačiai D_L vertei, maišymosi vaizdas gali būti skirtingas, nes jam įtakos turi aparato ilgis ir srauto greitis. Tyrimais įrodyta, kad panašių procesų išilginį maišymąsi apibūdina Peklė panašumo kriterijus:

$$Pe_L = w \cdot L / D_L . \qquad (5.16)$$

Iš (5.16) lygties matyti, kad, kai $Pe_L = 0$, tada $D_L = \infty$ ir turime idealiojo sumaišymo modelį, nes be galo greita difuzija visiškai išlygina koncentracijas. Kai $Pe_L = \infty$, tada $D_L = 0$ ir (5.15) lygtis tampa (5.8) lygtimi, o srauto judėjimas aprašomas idealiojo išstūmimo modeliu. Realiam srautui $0 < Pe_L < \infty$.

5.8 pav. pavaizduotos difuzinio modelio atgarsio funkcijos kreivės, kai indikatorius įmaišomas impulsiniu būdu.



5.8 pav. Difuzinio modelio atgarsio kreivės, kai indikatorius įmaišomas impulsiniu (*a*) ir pakopiniu (*b*) būdu

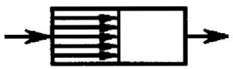
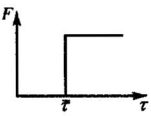
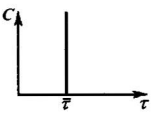
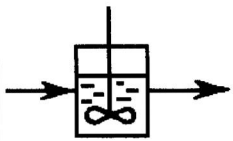
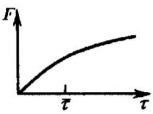
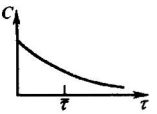
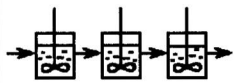
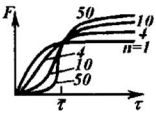
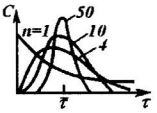
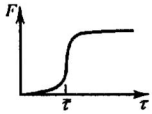
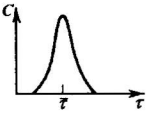
Buvimo trukmės sklaida gali būti apskaičiuota pagal tokią lygtį:

$$\sigma^2(\theta) = 2/Pe_L - 2\cdot\left(1 - e^{-Pe_L}\right)/Pe_L^2 . \qquad (5.17)$$

Kai $Pe_L > 10$, t. y. kai realus procesas šiek tiek nukrypsta nuo idealiojo išstūmimo modelio, galima naudoti ir apytikslę lygtį:

$$\sigma^2(\theta) = 2/Pe_L . \qquad (5.18)$$

5.1 lentelė. Srautų schemos, jų modelių matematiniai aprašymai ir atgarsio kreivės

Modelis	Srauto schema	Matematinis aprašymas	Atgarsio kreivės, kai indikatorius įmaišomas	
			pakopiniu būdu	impulsiniu būdu
Idealiojo išstūmimo (IIM)		$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -w\cdot\frac{\partial c}{\partial x}$		
Idealiojo sumaišymo (ISM)		$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{1}{\tau}\cdot(c_i - c)$		
Narvelinis		$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{n}{\tau}\cdot(c_{i-1} - c_i)$		
Difuzinis vieno parametro		$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -w\cdot\frac{\partial c}{\partial x} + D_L\cdot\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$		

Įvertinę (5.14) ir (5.18) lygtis, gauname santykį, nustatantį priklausomybę tarp narvelinio ir difuzinio modelių:

$$Pe_L/2 \approx n. \tag{5.19}$$

Difuzinis modelis paprastai naudojamas aprašant srautų struktūrą aparatuose su nenutrūkstamo fazių sąlyčio paviršiumi (pvz., įkrautinėse, plėvelinėse kolonose ir kt.).

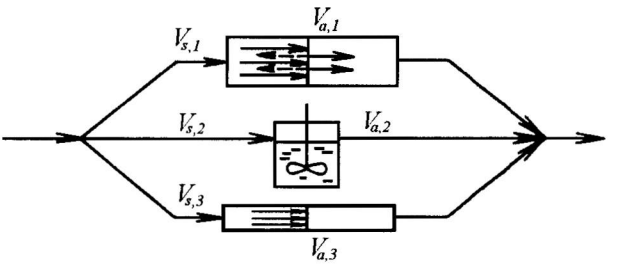
5.1 lentelėje pateiktos srautų schemos, atitinkančios nagrinėjamus modelius, jų matematiniai aprašymai ir atgarsio kreivės.

Be vieno parametro difuzinio modelio, gana plačiai naudojami dviejų parametrų difuziniai modeliai, įvertinantys ne tik išilginį, bet ir skersinį maišymąsi. Šis modelis apibūdinamas išilginio D_L ir radialinio D_R maišymosi koeficientais ir aprašomas lygtimi

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -w \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{D_R \cdot \partial}{r \cdot \partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \right); \tag{5.20}$$

čia r – srauto spindulys.

Radialinio maišymosi D_R ir išilginio maišymosi D_L koeficientai nustatomi eksperimentiškai.



5.9 pav. Kombinuotojo srautų struktūros modelio schema:
V_a – suminis aparato tūris, $V_{a,1}$ – aparato difuzinio modelio režimu dirbančios zonos tūris, $V_{a,2}$ – aparato idealiojo sumaišymo zonos tūris, $V_{a,1}$ – aparato idealiojo išstūmimo zonos tūris, V_s – suminis aparato debitas, $V_{S,1}$, $V_{S,2}$ ir $V_{S,3}$ – per atitinkamas zonas tekančių srautų debitai

Kombinuotieji modeliai. Ne visus realius procesus galima aprašyti anksčiau aptartais hidrodinaminės struktūros modeliais. Tada procesai skaidomi dalimis, kuriose pastebimi aplenkimo (aplinkinės grandinės) cirkuliacijos srautai, užsistovėjimo zonos. Tokiais atvejais naudojami kombinuoti hidrodinaminiai srautų struktūros modeliai. Sudarant tokius modelius, tariama, kad aparatą sudaro nuosekliai arba lygiagrečiai sujungtos atskiros darbo zonos,

kuriose srautų struktūra įvairi (idealiojo sumaišymo, idealiojo išstūmimo, išilginio maišymosi zona, užsistovėjimo zona ir t. t.).

Nagrinėjamame modelyje yra penki parametrai: aparato dalys $V_{a.1}/V_a$ ir $V_{a.2}/V_a$; srautų dalys $V_{s.1}/V_s$ ir $V_{s.2}/V_s$ (dalis $V_{s.3}/V_s$ apskaičiuojama pagal tokią lygtį $1-(V_{s.1}/V_s+V_{s.2}/V_s)=V_{s.3}/V_s)$; parametras Pe_L. Nagrinėjamame modelyje nustačius visus minėtus parametrus atliekamas srauto struktūros modeliavimas. Kad būtų išvengta klaidingų išvadų apie parametrų įtakos srauto struktūrai laipsnį kombinuotuosiuose modeliuose, reikia kruopščiai nustatyti parametrus.

Didinant įvairios srautų struktūros zonų skaičių, galima aprašyti bet kokio sudėtingumo procesus, bet matematinis modeliavimas šiuo atveju tampa sudėtingesnis. Jų aprašymai pateikiami specialioje literatūroje.

6 dalis

HIDROMECHANINIAI PROCESAI IR APARATAI

Vykstant cheminės technologijos ir maisto technologijos procesams (maišymo, dispergavimo, nusistovėjimo, filtravimo ir kt.) skysčiai, dujos, garai juda vamzdynais arba aparatais, susidaro arba perskiriamos heterogeninės sistemos. Kadangi visų tokių procesų greitis nusakomas hidromechanikos dėsniais, jie vadinami hidromechaniniais procesais.

Pagrindinės skysčių judėjimą nusakančios sąvokos ir lygtys pateiktos trečiojoje dalyje. Todėl čia nagrinėjamas pagrindinių hidromechanikos dėsnių bei sąvokų, dvifazių srautų judėjimo dėsningumų, heterogeninių sistemų susidarymo ir perskyrimo praktinis taikymas.

Skaičiuojant cheminės technologijos aparatuose vykstančius procesus, būtina atsižvelgti į srautų greitį, hidrodinaminę struktūrą ir kitas hidrodinamines sąlygas. Šioje dalyje nagrinėjama, kaip apskaičiuojamas hidrodinaminių procesų varos jėgos ir aparatų hidraulinis pasipriešinimas, nuo kurio priklauso energijos sąnaudos bet kuriam technologiniam procesui vykdyti. Žinant hidraulikos dėsnius, taip pat galima išspręsti daug kitų inžinerinių uždavinių, pvz., vamzdynais tekančio skysčio debito nustatymo, greičio pasiskirstymo nuo vertikalios sienelės tekančioje skysčio plėvelėje, skysčio ištekėjimo iš rezervuaro trukmės apskaičiavimo ir t. t.

6.1. Pagrindinė hidrostatikos lygtis

Kaip buvo minėta 3 dalyje, hidrostatikoje nagrinėjama santykinės rimties būsenos skysčių pusiausvyra. Šios būsenos skysčio tūrio forma nesikeičia, vidinės trinties jėga neveikia. Tokiu atveju sprendžiant Navjė ir Stokso (3.65) lygtis, kai skysčio srauto greičiai pagal atitinkamas ašis lygūs nuliui, gaunama pusiausvyros Eulerio diferencialinių lygčių sistema (3.66):

$$-\partial p/\partial x = 0; \qquad -\partial p/\partial y = 0; \qquad -\rho \cdot g - \partial p/\partial z = 0.$$

Iš (3.66) lygties išeina, kad rimties būsenos skysčio slėgis kinta tik pagal vertikaliąją (z) ašį, išlikdamas pastovus visuose horizontaliosios plokštumos

xy taškuose, nes slėgio kitimas išilgai *x* ir *y* ašies lygus nuliui. Kadangi dalinės išvestinės $\partial p/\partial x$ ir $\partial p/\partial y$ lygios nuliui, tai dalinę išvestinę $\partial p/\partial z$ galima pakeisti pilnutine išvestine dp/dz. Tada

$$-\rho \cdot g - dp/dz = 0, \quad \text{arba} \quad -dp - \rho \cdot g \cdot dz = 0. \qquad (6.1)$$

Visus (6.1) lygties narius padaliję iš $\rho \cdot g$ ir padauginę iš -1, gauname:

$$dz + dp/(\rho \cdot g) = 0.$$

Kadangi nespūdaus vienalyčio skysčio tankis $\rho = const$, todėl

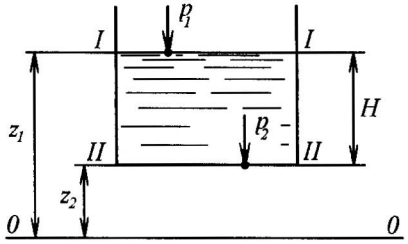
$$dz + d[p/(\rho \cdot g)] = 0, \quad \text{arba} \quad d[z + p/(\rho \cdot g)] = 0.$$

Suintegravę šią lygtį, gauname:

$$z + p/(\rho \cdot g) = const. \qquad (6.2)$$

Laisvai pasirinkus dvi horizontalias plokštumas *I–I* ir *II–II* (6.1 pav.), (6.2) lygtį galima užrašyti taip:

$$z_1 + p_1/(\rho \cdot g) = z_2 + p_2/(\rho \cdot g). \qquad (6.3)$$



6.1 pav. Pagrindinės hidrostatikos lygties išvedimo iliustracija

(6.2) ir (6.3) lygtys vadinamos pagrindinėmis hidrostatikos lygtimis. Dydis *z*, apibūdinantis taško vertikalųjį atstumą nuo laisvai pasirinktos atskaitymo plokštumos *0–0* (6.1 pav.), vadinamas geometrinio slėgio arba nivelyriniu aukščiu. Jis matuojamas ilgio vienetais:

$$[z] = [p/(\rho \cdot g)] = [p/\gamma] = [N \cdot m^3/(m^2 \cdot N)] = [N \cdot m/N] = [m].$$

Pagal fizikinę prasmę geometrinio slėgio arba nivelyrinis aukštis parodo energiją $[N \cdot m]$, tenkančią skysčio svorio vienetui $[N]$, ir apibūdina taško padėties virš laisvai pasirinktos lyginamosios plokštumos savitąją potencinę energiją.

Dydis $p/(\rho \cdot g)$ vadinamas hidrostatiniu arba pjezometriniu (graik. *piezo* – slegiu, spaudžiu) slėgio aukščiu. Hidrostatinio slėgio aukštis pagal fizikinę prasmę parodo energiją, tenkančią skysčio svorio vienetui, ir apibūdina savitąją slėgio potencinę energiją tiriamajame taške.

Remiantis pagrindine hidrostatikos lygtimi, galima teigti, kad skysčio padėties savitosios potencinės ir statinio slėgio savitosios potencinės slėgio energijos suma yra pastovus dydis ir lygus visam hidrostatinio slėgio aukščiui. Tai reiškia, kad pagrindinė hidrostatikos lygtis yra dalinis energijos tvermės dėsnio atvejis.

Iš (6.3) lygties išreiškę slėgį plokštumoje *II–II* (6.1 pav.) p_2, gauname:

$$p_2 = p_1 + \rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2). \qquad (6.4)$$

(6.4) lygtis yra Paskalio dėsnio išraiška, iš kurios išplaukia, kad ramybės būsenos nespūdaus skysčio bet kuriame taške susidarantis slėgis visomis kryptimis perduodamas vienoda jėga. Pasikeitus slėgiui p_1 taške z_1 kokiu nors dydžiu, tuo pačiu dydžiu pasikeičia ir slėgis bet kuriame kitame skysčio taške.

(6.3) ir (6.4) lygtys yra išvestos idealiam skysčiui ir neįvertina slėgimo ir tempimo, paviršiaus įtempio ir kt. jėgų veikimo. Realiems skysčiams, kuriuos, esant nedideliems slėgiams, galima laikyti nesuspaudžiamais, tempimo ir paviršiaus įtempio jėgos pasireiškia tik esant labai mažiems skysčio kiekiams (pvz., siauruose kapiliaruose). Kadangi technologiniuose procesuose naudojami dideli skysčio tūriai, tai (6.3) ir (6.4) lygtys be didesnės paklaidos gali būti naudojamos ir realiems skysčiams.

Pagrindinė hidrostatikos lygtis (arba Paskalio dėsnis) naudojama, skaičiuojant skysčio slėgį į indo dugną ir sieneles, skaičiuojant hidrostatines mašinas (hidrostatinį presą), hidraulines užtvaras, nustatant skysčio lygį susisiekiančiuosiuose induose, matuojant slėgį diferenciniu manometru, ir kitur.

6.1.1. Rimties būsenos skysčio slėgis į indo dugną ir sieneles

Rimties būsenos skysčio slėgis į horizontalų indo dugną visuose jo taškuose vienodas, o slėgis į jo šonines sieneles didėja, didėjant vertikaliajam atstumui nuo paviršiaus. Iš čia išeina, kad slėgis į indo dugną nepriklauso nuo indo formos arba jo šoninių sienelių pasvirimo kampo, taip pat nuo skysčio tūrio inde. Kai inde esančio skysčio paviršių veikia slėgis p_1 ir skysčio sluoksnio inde aukštis H (6.1 pav.), tai slėgis į indo dugną p_2 apskaičiuojamas taip:

$$p_2 = p_1 + \rho \cdot g \cdot H .$$

Turint tankio ρ skystį, skysčio slėgio į indo dugną jėga P priklauso tik nuo skysčio stulpo aukščio H ir indo dugno ploto F:

$$P = p_2 \cdot F, \text{ arba } P = (p_1 + \rho \cdot g \cdot H) \cdot F. \qquad (6.5)$$

Kadangi skysčio slėgis į vertikaliąją indo sienelę keičiasi, kintant jos aukščiui, tai suminė slėgio jėga į ją pasiskirsto netolygiai ir apskaičiuojama pagal formulę

$$P = (p_1 + \rho \cdot g \cdot h) \cdot F_s; \qquad (6.6)$$

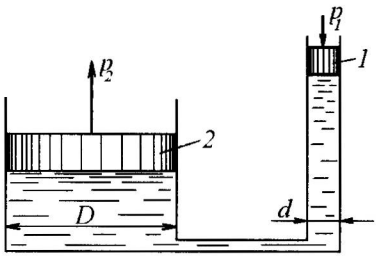
čia h – atstumas nuo viršutinio skysčio lygio iki skysčio drėkinamos sienelės, kurios paviršiaus plotas F_s, sunkio centro.

Iš (6.6) lygties išplaukia, kad slėgio jėga į vertikaliąją sienelę lygi skysčio drėkinamo paviršiaus ploto ir hidrostatinio slėgio į drėkinamos sienelės sunkio centrą sandaugai. Slėgio į sienelę jėgos veikimo centras vadinamas slėgio centru. Šis taškas yra žemiau už sienelės drėkinamo paviršiaus sunkio centrą. Pvz., plokščios sienelės slėgio centras nuo viršutinio skysčio lygio yra $\frac{2}{3} \cdot H$ atstumu.

6.1.2. Hidrostatinės mašinos

Labiausiai paplitusi hidrostatinė mašina yra hidraulinis presas, kuris naudojamas įvairioms medžiagoms (plastikams, kermeto milteliams ir kt.) presuoti ir briketuoti.

Hidraulinis presas veikia pagal Paskalio dėsnį. Nedidele jėga p_1 veikiant cilindre judantį mažesnio skersmens d stūmoklį *1* (6.2 pav.), į jį bei į cilindre esantį darbinį skystį (vandenį, tepalą ir kt.) sudarytas slėgis p bus perduodamas ir didesnio skersmens D stūmokliui *2*.



6.2 pav. Hidraulinio preso veikimo schema

Slėgio jėgos į stūmoklius *1* ir *2* apskaičiuojamos pagal lygtis:

$$p_1 = p \cdot F_1 = p \cdot \pi \cdot d^2/4; \quad p_2 = p \cdot F_2 = p \cdot \pi \cdot D^2/4.$$

Iš čia, neatsižvelgdami į skysčių lygių skirtumą cilindruose, gauname:

$$p_2 = p_1 \cdot D^2/d^2 .$$

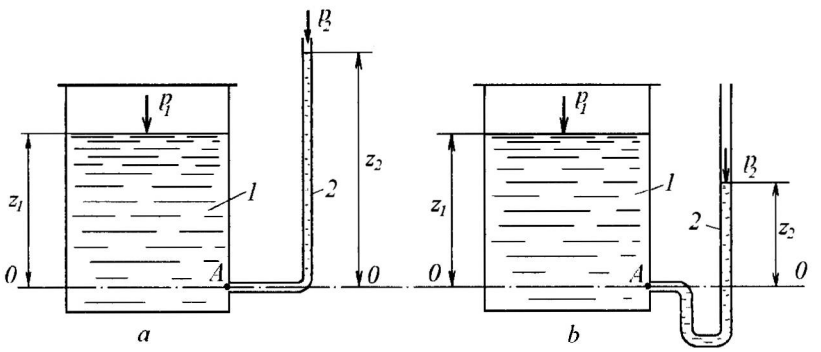
Taigi stūmoklis *2* perduos slėgio jėgą tiek kartų didesnę už tą, kuria yra veikiamas stūmoklis *1*, kiek kartų stūmoklio *2* skerspjūvio plotas didesnis už stūmoklio *1* skerspjūvio plotą.

6.1.3. Slėgio matavimo prietaisai

Atmosferoje (aplinkoje) esantį slėgį rodantys prietaisai vadinami barometrais. Įrenginyje esančio ir atmosferos slėgių skirtumui matuoti naudojami manometrai, vakuummetrai, pjezometrai. Paprasčiausias prietaisas yra pjezometras. Tai atviras stiklinis vamzdelis (6.3 pav.). Kad būtų išvengta kapiliarinių jėgų įtakos matavimo rezultatams, tokių vamzdelių skersmuo turi būti ne mažesnis kaip 8...10 mm.

Kai slėgis aparate p_1 didesnis už atmosferos slėgį p_2 ($p_1 > p_2$) ir esant pusiausvyrai (6.3 pav., *a*), slėgiai p', kurie rodo slėgius kairėje ir dešinėje taško *A* pusėse, turi būti lygūs. Tada slėgiai taške *A* nuo indo *1* pusės ir nuo vamzdelio *2* pusės atitinkamai lygūs:

$$p' = p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1; \qquad p' = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 .$$



6.3 pav. Slėgio matavimas pjezometru:
1 – rezervuaras, *2* – pjezometrinis vamzdelis

Išreiškiame slėgį p_1:

$$p_1 = p_2 + \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1) .$$

Dydis $\rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$ nusako perteklinį slėgį rezervuare *1* virš skysčio esančio atmosferos slėgio atžvilgiu.

Dydis z_2 vadinamas pjezometriniu aukščiu, atitinkančiu perteklinį slėgį taške *A*, o vamzdelis *2* – pjezometru.

Kai slėgis aparate mažesnis už atmosferos slėgį, t. y. $p_1 < p_2$, tai slėgis taške *A* gali būti išmatuotas vamzdeliu *2*, kuris šiuo atveju vadinamas atbuliniu pjezometru, arba dažniau vakuummetru. Taške *A* slėgiai iš skysčio pusės rezervuare *1* ir *2* atitinkamai yra:

$$p' = p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1; \qquad p' = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2.$$

Iš čia

$$p_1 = p_2 + \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1).$$

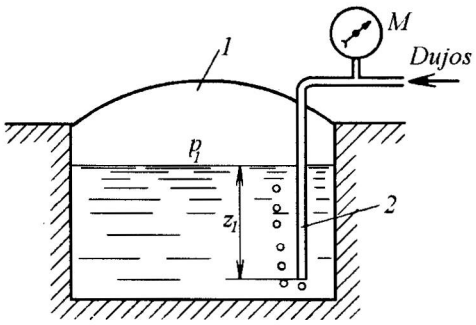
Nagrinėjamuoju atveju $z_2 < z_1$ ir reiškinys $\rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$ turės minuso ženklą.

6.1.4. Skysčio kiekio rezervuaruose išmatavimas

Į rezervuarą *1* (6.4 pav.) arti dugno įleidžiamas vamzdelis *2*, pro kurį galima tiekti dujas (orą, azotą ir kt.). Dujų slėgis vamzdyje matuojamas manometru *M*.

Kad patektų į rezervuarą, dujos turi nugalėti rezervuare esančio skysčio stulpo aukščio z_1 pasipriešinimą. Tada dujos burbuliukų pavidalu pradės tekėti per skysčio sluoksnį ir nusistovės tolygus jų tekėjimas bei pastovus slėgis. Slėgis p_2 pagal (6.4) lygtį bus lygus $p_2 = p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1$. Tada

$$z_1 = (p_2 - p_1)/(\rho \cdot g). \qquad (6.7)$$



6.4 pav. Skysčio tūrio saugykloje nustatymo schema:
1 – rezervuaras, *2* – matavimo vamzdis

Žinodami skysčio stulpo rezervuare aukštį z_1 ir jo skersinio pjūvio plotą F, apskaičiuojame rezervuare esančio skysčio tūrį. (6.7) lygtis galioja pastovaus skerspjūvio rezervuarams. Kintamo skerspjūvio rezervuarams būtina žinoti priklausomybę $F = f(z_1)$, o juose esančio skysčio tūrį apskaičiuoti gerokai kebliau.

6.2. Bernulio lygtis

Taikant Navjė ir Stokso lygtį idealiam skysčiui (3 dalis), gauta (3.66) lygčių sistema:

$$\rho \cdot \frac{\partial w_x}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial x}; \qquad \rho \cdot \frac{\partial w_y}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial y}; \qquad \rho \cdot \frac{\partial w_z}{\partial \tau} = -\rho \cdot g - \frac{\partial p}{\partial z}.$$

Šios sistemos lygtys vadinamos idealaus skysčio judėjimo Eulerio diferencialinėmis lygtimis. Suintegravus šias lygtis, gaunama viena iš pagrindinių hidrodinamikos lygčių – Bernulio lygtis, dažnai naudojama inžineriniuose skaičiavimuose.

Bernulio lygtis išvedama taip: jėgoms visame nagrinėjamame judančio idealiojo skysčio tūryje apskaičiuoti Eulerio lygčių kairioji ir dešinioji pusės padauginamos iš atitinkamo tiriamojo tūrio briaunos ilgio (dx, dy, dz) ir padalijamos iš ρ:

$$\frac{dw_x}{d\tau} \cdot dx = \frac{dx}{d\tau} \cdot dw_x = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx;$$

$$\frac{dy}{d\tau} \cdot dw_y = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \cdot dy; \qquad \frac{dz}{d\tau} dw_z = -g \cdot dz - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \cdot dz.$$

Iš anksčiau pateiktų duomenų žinome, kad

$$dx/d\tau = w_x; \quad dy/d\tau = w_y; \quad dz/d\tau = w_z.$$

Tada:

$$w_x \cdot dw_x = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx;$$

$$w_y \cdot dw_y = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \cdot dy;$$

$$w_z \cdot dw_z = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \cdot dz - g \cdot dz.$$

Sudėję kairiąsias ir dešiniąsias šių lygčių puses, gausime:

$$w_x \cdot dw_x + w_y \cdot dw_y + w_z \cdot dw_z =$$
$$= -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial p}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial p}{\partial z} \cdot dz \right) - g \cdot dz. \qquad (6.8)$$

Kairiojoje (6.8) lygties pusėje atliekame pertvarkymus:

$$w_x \cdot dw_x = d(w_x^2/2); \quad w_y \cdot dw_y = d(w_y^2/2); \quad w_z \cdot dw_z = d(w_z^2/2),$$

tada:

$$w_x \cdot dw_x + w_y \cdot dw_y + w_z \cdot dw_z = d(w_x^2/2) + d(w_y^2/2) + d(w_z^2/2) =$$
$$= d(w_x^2/2 + w_y^2/2 + w_z^2/2) = d(w^2/2).$$

Dešiniojoje (6.8) lygties pusėje skliaustuose esantis narys yra pilnasis hidrostatinio slėgio diferencialas *dp*.

Įvertinus atliktus pertvarkymus, (6.8) lygtis įgauna tokią išraišką:

$$d\left(w^2/2\right) = -g \cdot dz - dp/\rho . \qquad (6.9)$$

Abi (6.9) lygties puses padaliję iš *g*, gauname:

$$d\left[w^2/(2 \cdot g)\right] = -dz - dp/(\rho \cdot g) \text{ arba}$$
$$dz + dp/(\rho \cdot g) + d\left[w^2/(2 \cdot g)\right] = 0 . \qquad (6.10)$$

Kadangi nagrinėjamuoju atveju $\rho = const$ ir $g = const$, tai diferencialų suma gali būti pakeista sumos diferencialu:

$$d\left[z + p/(\rho \cdot g) + w^2/(2 \cdot g)\right] = 0 . \qquad (6.11)$$

Suintegravę (6.11) lygtį, gauname:

$$z + p/(\rho \cdot g) + w^2/(2 \cdot g) = const = H . \qquad (6.12)$$

(6.12) lygtis vadinama Bernulio lygtimi idealiam skysčiui. Dydis $\left[z + p/(\rho \cdot g) + w^2/(2 \cdot g)\right]$ vadinamas suminiu arba hidrodinaminiu slėgio aukščiu arba patvanka. Iš šios lygties matyti, kad esant bet kuriam srauto skerspjūviui vertė *H* turi būti pastovi, t. y.

$$z_1 + p_1/(\rho \cdot g) + w_1^2/(2 \cdot g) =$$
$$= z_2 + p_2/(\rho \cdot g) + w_2^2/(2 \cdot g) = \ldots = H. \qquad (6.13)$$

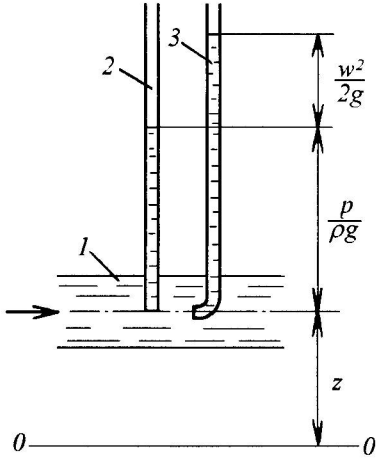
Du pirmieji (6.12) lygties nariai buvo nagrinėti, analizuojant pagrindinę hidrostatikos lygtį: z – geometrinio slėgio aukštis laisvai pasirinktos horizontaliosios plokštumos atžvilgiu, arba savitoji potencinė padėties energija; $p/(\rho \cdot g)$ – statinio arba pjezometrinio slėgio aukštis, lygus skysčio stulpo slėgiui virš nagrinėjamojo lygio, arba savitoji potencinė slėgio energija.

Suma $z + p/(\rho \cdot g)$ yra savitoji potencinė energija nagrinėjamame srauto skerspjūvyje ir matuojama aukščio vienetais (m) arba savitosios energijos vienetais, t. y. energijos kiekiu, tenkančiu skysčio svorio vienetui (J/N).

Trečiasis (6.12) lygties narys, t. y. $w^2/(2 \cdot g)$, yra dinaminio slėgio aukštis nagrinėjamame srauto skerspjūvyje, arba savitoji kinetinė energija.

Vykstant nuostoviajam idealiojo skysčio tekėjimui bet kuriame srauto skerspjūvyje, potencinės $[z + p/(\rho \cdot g)]$ ir kinetinės $[w^2/(2 \cdot g)]$ skysčio energijų suma yra pastovus dydis. Bernulio lygtis yra dalinis energijos tvermės dėsnio atvejis.

Bernulio lygtis teigia, kad, keičiantis srauto (kanalo, vamzdyno, aparato) skerspjūviui ir atitinkamai skysčio judėjimo greičiui, energija keičiasi. Srauto skerspjūviui mažėjant, dalis potencinės energijos pereina į kinetinę, o skerspjūviui didėjant, dalis kinetinės energijos virsta potencine, tačiau suminis energijos kiekis nesikeičia.



6.5 pav. Horizontaliojo srauto schema su pažymėtais idealiojo skysčio čiurkšlei sudarytos Bernulio lygties nariais:
1 – vamzdis, *2* – pjezometrinis vamzdelis, *3* – suminio (statinio ir dinaminio) slėgio aukščio matavimo vamzdelis

Horizontaliam vamzdynui (6.5 pav.) Bernulio lygtis gali būti supaprastinta. Šiuo atveju horizontaliąją atskaitymo plokštumą nubrėžus per srauto ašį ($z = 0$), (6.12) lygtis užrašoma taip:

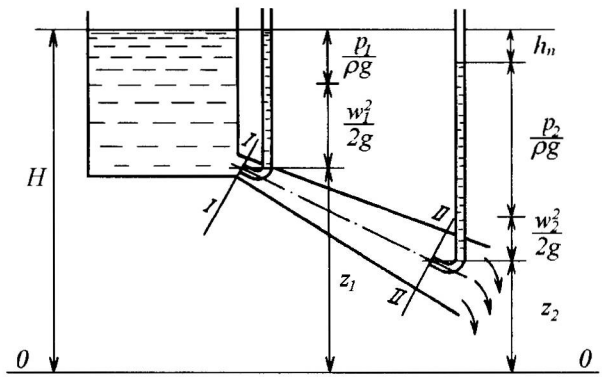
$$p/(\rho \cdot g) + w^2/(2 \cdot g) = H\,. \qquad (6.12a)$$

Judant realiajam skysčiui, jo hidrodinaminio slėgio aukštis H ir srauto potencinės ir kinetinės energijų suma nėra pastovūs. Skysčio srauto daleles veikia klampos jėgos, be to, srautas susiduria su įvairiomis kliūtimis (sklendėmis, ventiliais, posūkiais ir t. t.) ir dėl to keičiasi jo kryptis arba skerspjūvio plotas.

Tokiems hidrauliniams pasipriešinimams nugalėti sunaudojama judančio skysčio energija, kuri virsta šiluma. Šiluma sunaudojama srautui šildyti ir išsisklaido į aplinką.

Kadangi dalis potencinės energijos virsta slėgio aukščio nuostoliais (6.6 pav.), todėl bet kuriame tolesniame srauto skerspjūvyje dalelės energija bus mažesnė negu nagrinėjamame:

$$z_1 + p_1/(\rho \cdot g) + w_1^2/(2 \cdot g) > z_2 + p_2/(\rho \cdot g) + w_2^2/(2 \cdot g). \quad (6.13a)$$



6.6 pav. Srauto schema su pažymėtais realiojo skysčio čiurkšlei sudarytos Bernulio lygties nariais

Iš 6.6 paveikslo matyti, kad norint bet kuriame srauto skerspjūvyje išsaugoti slėgio aukščių (arba energijų) lygybę, reikia prie Bernulio lygties dešiniosios pusės pridėti narį, įvertinantį slėgio aukščio nuostolius:

$$z_1 + p_1/(\rho \cdot g) + w_1^2/(2 \cdot g) = z_2 + p_2/(\rho \cdot g) + w_2^2/(2 \cdot g) + h_n\,. \qquad (6.14)$$

Kiekviename srauto skerspjūvyje, esant nuostoviajam klampiojo skysčio tekėjimui, statinio, dinaminio ir geometrinio slėgių aukščių suma ir slėgio aukščio nuostolių suma yra pastovus dydis, lygus suminiam hidrodinaminio slėgio aukščiui H.

Slėgio aukščio nuostoliai h_n skirstomi į slėgio aukščio nuostolius dėl trinties h_{tr} ir slėgio aukščio nuostolius dėl vietinių kliūčių h_{vk}:

$$h_n = h_{tr} + h_{vk}. \qquad (6.15)$$

Kaip apskaičiuojami slėgio aukščio nuostoliai h_{tr} ir h_{vk} bus nagrinėjama 6.4 skyriuje.

Naudojant Bernulio lygtį, galima nustatyti reikalingą slėgio aukštį arba slėgį, kad skystis nurodytu greičiu judėtų nagrinėjamu kanalu, taip pat skysčio ištekėjimo iš rezervuaro pro angas ir antgalius greitį ir debitą.

6.3. Hageno ir Puazeilio lygtis

Nespūdaus skysčio nuostoviojo laminarinio tekėjimo atveju tiesiame skritulio formos skerspjūvio kanale slėgio aukščio nuostolius h_{tr} galima apskaičiuoti teoriškai.

Navjė ir Stokso lygčiai spręsti naudojant cilindrines koordinates, anksčiau buvo gauta (3.75) lygtis:

$$\frac{1}{r}\cdot\frac{d}{dr}\left(r\cdot\frac{dw_y}{dr}\right) = -\frac{p_1 - p_2}{\mu\cdot L};$$

čia r – momentinis tekančio srauto spindulys, m; p_1 ir p_2 – slėgis laisvai pasirinktuose srauto skerspjūviuose *1* ir *2*, Pa; L – atstumas (ilgis) tarp skerspjūvių *1* ir *2*, m.

Suintegravę lygtį ribinėmis sąlygomis, kai $r = R$ (R – vamzdžio spindulys), $w_y = 0$ ir $dw_y/dr = 0$ (jei $r = 0$), gauname:

$$w_y = (p_1 - p_2)\cdot\left(R^2 - r^2\right)/(4\cdot\mu\cdot L). \qquad (6.16)$$

Kai $r = 0$, greitis srauto ašyje yra maksimalus: $w_y = w_{maks}$.

Iš (6.16) lygties, kai $r = 0$, gauname:

$$w_{maks} = (p_1 - p_2)\cdot R^2/(4\cdot\mu\cdot L). \qquad (6.17)$$

Tada bendruoju atveju

$$w_y = w_{maks}\cdot\left(R^2 - r^2\right)/R^2 = w_{maks}\cdot\left(1 - r^2/R^2\right). \qquad (6.18)$$

(6.18) lygtis, kuri kartais vadinama Stokso dėsniu, išreiškia nuostoviojo laminarinio srauto parabolinį greičių pasiskirstymą skritulio skerspjūvio vamzdyne. Realiomis sąlygomis greičių parabolinis pasiskirstymas nusistovi tik tam tikru atstumu nuo srauto įtekėjimo, kadangi dėl įtekėjimo efekto įtekantis srautas patiria trikdymų. Vamzdžio atkarpa, kurioje pastebimi šie srauto trikdymai, iki nusistovi nuostovusis režimas, vadinama stabilizacijos ruožu.

Skysčio debitas dV_s, pratekantis per elementarų srauto skerspjūvio plotą $dF = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$, apskaičiuojamas pagal lygtį

$$dV_s = w_y \cdot dF = \frac{p_1 - p_2}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot \left(R^2 - r^2\right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr. \qquad (6.19)$$

Suintegravę (6.19) lygtį nuo *0* iki V_s ir nuo *0* iki *R*, gauname:

$$V_s = \frac{p_1 - p_2}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot \int_0^R \left(R^2 - r^2\right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr =$$
$$= \frac{p_1 - p_2}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot R^2\right) \cdot \int_0^R r \cdot dr - 2 \cdot \pi \cdot \int_0^R r^3 \cdot dr = \frac{p_1 - p_2}{8 \cdot \mu \cdot L} \cdot \pi \cdot R^4. \qquad (6.20)$$

Iš debito lygties gauname: $V_s = w \cdot F = w \cdot \pi \cdot R^2$. Tada

$$\left(p_1 - p_2\right) \cdot \pi \cdot R^4 / \left(8 \cdot \mu \cdot L\right) = w \cdot \pi \cdot R^2,$$

$$w = \left(p_1 - p_2\right) \cdot R^2 / \left(8 \cdot \mu \cdot L\right). \qquad (6.21)$$

Palyginus (6.17) ir (6.21) lygtis, matyti, kad, esant laminariniam srautui, maksimalus skysčio tekėjimo vamzdžio ašyje greitis lygus dviem vidutiniams srauto greičiams: $w_{maks} = 2 \cdot w$.

Atsižvelgiant į tai, kad $p_1 - p_2 = \Delta p$ ir $d = 2 \cdot R$, (6.20) lygtis užrašoma taip:

$$V_s = \Delta p \cdot \pi \cdot d^4 / \left(128 \cdot \mu \cdot L\right). \qquad (6.22)$$

(6.22) lygtis vadinama Hageno ir Puazeilio lygtimi. Ją naudojant galima apskaičiuoti skysčio debitą V_s, esant laminariniam skysčių tekėjimui vamzdžiu, kurio ilgis *L* ir skersmuo *d*, jeigu žinomi slėgio nuostoliai Δp vamzdyno atkarpoje *L*. Dažniausiai šia lygtimi apskaičiuojamas Δp.

6.4. Vamzdynų ir aparatų hidraulinis pasipriešinimas

Hidrodinaminių procesų varos jėga yra slėgių *p* arba hidrodinaminio slėgio aukščių *H* skirtumas tarp dviejų srauto taškų arba skerspjūvių. Jai nustatyti būtina žinoti slėgio aukščio nuostolius h_n ((6.14) lygtis), kurie susideda iš trin-

ties slėgio aukščio nuostolių h_{tr} ir vietinių kliūčių slėgio aukščio nuostolių h_{vk}. Slėgio aukščio nuostoliams dėl trinties apskaičiuoti, esant laminariniam skysčio judėjimui, naudojama Hageno ir Puazeilio lygtis. Remiantis debito lygtimi $V_s = w \cdot \pi \cdot d^2/4$, iš (6.22) lygties išreiškiamas Δp:

$$\Delta p = 64 \cdot w \cdot \mu \cdot L/\left(2 \cdot d^2\right). \qquad (6.23)$$

Padauginę ir padaliję (6.23) lygties dešiniąją pusę iš $\rho \cdot w$, gauname:

$$\Delta p = \frac{64 \cdot \mu \cdot L \cdot \rho \cdot w^2}{w \cdot d \cdot \rho \cdot d \cdot 2} = \frac{64 \cdot L \cdot \rho \cdot w^2}{Re \cdot d \cdot 2} = \lambda \cdot \frac{L \cdot \rho \cdot w^2}{d \cdot 2}. \qquad (6.24)$$

Pagal prasmę Δp (6.24) lygtyje apibūdina slėgio nuostolius dėl trinties skysčiui tekant vamzdyne, kurio ilgis L. Bedimensis dydis λ vadinamas hidraulinės trinties koeficientu $\lambda = f(Re)$, o dydis $\lambda \cdot L/d = \zeta$ – pasipriešinimo trinčiai koeficientu arba tiesiog trinties koeficientu $\zeta = f(Re, L/d)$. Tada

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot w^2/2, \qquad (6.25)$$

$$h_{tr} = \Delta p/(\rho \cdot g) = \zeta \cdot w^2/(2 \cdot g). \qquad (6.26)$$

Slėgio nuostoliai dėl trinties Δp arba dėl slėgio aukščio h_{tr} išreiškiami dinaminio slėgio $\rho \cdot w^2/2$ arba slėgio aukščio $w^2/(2 \cdot g)$ dalimis.

(6.24) lygtis dažnai vadinama Darsi ir Veisbacho lygtimi. Pagal ją apskaičiuoti slėgio nuostoliai sutampa su bandymų duomenimis, esant laminariniam srauto tekėjimui. Ją taip pat galima naudoti, skaičiuojant slėgio arba slėgio aukščio nuostolius, esant turbulentiniam skysčio tekėjimui. Kadangi trinties koeficiento atžvilgiu negalima išspręsti Navjė ir Stokso lygties ir turbulentinio srauto struktūra yra labai sudėtinga, todėl lygtys trinties koeficientui apskaičiuoti gaunamos panašumo teorijos metodais apibendrinant bandymų duomenis.

Iš (6.25) lygties:

$$\Delta p/\left(\rho \cdot w^2\right) = Eu = \zeta/2, \qquad (6.27)$$

t. y. $Eu = \zeta/2 = f(Re; L/d)$.

Pvz., iš hidrodinaminių procesų panašumo turime:

$$Eu = A \cdot Re^m \cdot (L/d)^n. \qquad (6.28)$$

Tuomet trinties koeficientas $\zeta = 2 \cdot A \cdot Re^m \cdot (L/d)^n$.

Apdorojant skysčio judėjimo glotniais kanalais, kai $Re = 4000...100000$, bandymų duomenis, nustatyta, kad $A = 0{,}158$, $m = -0{,}25$, $n = 1$. Tada

$$Eu = 0{,}158 \cdot Re^{-0.25} \cdot (L/d).$$

Pertvarkę (6.25) ir (6.26) lygtis, gauname:

$$\Delta p = \frac{0{,}316 \cdot L \cdot \rho \cdot w^2}{\sqrt[4]{Re} \cdot d \cdot 2}; \qquad (6.29)$$

$$h_{tr} = \frac{0{,}316}{\sqrt[4]{Re}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}. \qquad (6.30)$$

Pertvarkę (6.29) ir (6.30) lygtis, gauname, kad trinties koeficientas, srautui tekant turbulentiškai,

$$\lambda = 0{,}316 / \sqrt[4]{Re}. \qquad (6.31)$$

Į (6.24) ir (6.29) lygtis įrašę ζ išraiškas, gausime, kad, esant laminariniam skysčio judėjimui, $\Delta p \sim w$, o turbulentiniam – $\Delta p \sim w^{1.75}$.

Jei kanalų skerspjūvis ne skritulio formos, (6.24)...(6.31) lygtyse vietoj d įrašomas ekvivalentinis kanalo skersmuo d_{ekv}, o $\lambda = B/Re^n$ (B – nuo kanalo skerspjūvio formos priklausantis koeficientas).

Tekant neizoterminiam srautui, kada tekantis skystis šyla arba aušta, vamzdžio sienelės temperatūra skiriasi nuo tekančio skysčio temperatūros. (6.24)...(6.31) lygčių dešiniosiose pusėse įrašomas pataisos koeficientas, įvertinantis vietinį (prie sienos) skysčio klampos pasikeitimą (šildant skysčio klampa prie sienelės yra mažesnė už pagrindinio srauto klampą, o pataisos koeficientas mažesnis už vienetą).

Inžineriniuose skaičiavimuose neizoterminio srauto slėgio nuostoliai nustatomi tik tais atvejais, kai sienelės temperatūra nuo skysčio temperatūros skiriasi daugiau kaip du kartus.

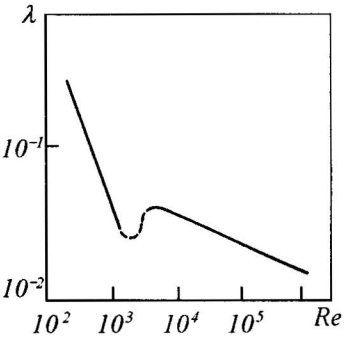
Realių procesų metu skystis juda vamzdžiais, kurių sienelės turi mažų nelygumų, vadinamų šiurkštumu. Panagrinėsime sienelių šiurkštumo įtaką trinčiai, kuri atsiranda skysčiui tekant vamzdyje.

6.7 pav. matyti šiurkštumo įtaka. Esant laminariniam ir pereinamajam skysčio tekėjimui, ji nedidelė. Netgi tuo atveju, kai tekėjimas tampa turbulentinis, bet Re nedidelis, tai šiurkštumo efektas mažas. Kadangi klampus pasienio sluoksnis uždengia šiurkštumo iškilimus ($\delta > \Delta$), vamzdžius galima nagrinėti kaip hidrauliškai glotnius. λ galima apskaičiuoti pagal (6.31) lygtį, kur δ – klampaus sluoksnio prie vamzdžio sienelės storis; Δ – vidutinis vamzdžio vidinės sienelės nelygumų aukštis arba šiurkštumo dydis. Pvz., naujų plieninių

vamzdžių šiurkštumas $\Delta \approx 0{,}1\ mm$, o vartotų ir ant vidinio paviršiaus turinčių nuosėdų $\Delta = 1 \ldots 2\ mm$ ir t. t.

Glotniojo tekėjimo sritis išlieka, kai $2300 < Re < 10/\varepsilon$; čia $\varepsilon = \Delta / d_{ekv}$ – santykinis (savitasis) šiurkštumas, kurio vertės parenkamos iš žinynų.

Didėjant Reinoldso kriterijui, pasienio klampaus sluoksnio storis mažėja ir kai pasiekiama $\delta < \Delta$, klampus pasienio sluoksnis neuždengia šiurkštumo iškilimų. Šiuo atveju trinties koeficientas priklauso ne tik nuo *Re*, bet ir nuo Δ, t. y. $\lambda = f(Re, \Delta)$. Tokiomis sąlygomis apie šiurkštumo iškilimus gali susidaryti sūkuriai ir koeficiento λ vertė gali viršyti apskaičiuotą pagal (6.31) lygtį. Ši mišraus tekėjimo sritis pastebima, kai $10/\varepsilon < Re < 560/\varepsilon$.



6.7 pav. Trinties koeficiento λ priklausomybė nuo Reinoldso kriterijaus

Toliau didėjant Reinoldso skaičiui, kai $Re > 560/\varepsilon$, atsiranda tekėjimo sritis, kurioje trinties koeficientas priklauso tik nuo šiurkštumo dydžio, t. y. $\lambda = f(\Delta)$. Šioje srityje jo vertė nepriklauso nuo *Re*. Tokia sritis vadinama automodelumo, o kartais kvadratine sritimi, kur $\Delta p \approx w^2$ (žr. (6.26) lygtį).

Apibendrinant visų turbulentinio tekėjimo sričių eksperimentinius duomenis apie vamzdynų hidraulinį pasipriešinimą, išvesta tokia lygtis trinties koeficientui apskaičiuoti:

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \cdot lg\left[0{,}27 \cdot \varepsilon + (6{,}81/Re)^{0{,}9}\right]. \qquad (6.32)$$

Automodelumo sričiai (6.32) lygties kvadratiniuose skliaustuose esantis antrasis dėmuo yra nedidelis ir jo galima nepaisyti. Tada galima taikyti tokią lygtį:

$$1/\sqrt{\lambda} = 2 \cdot lg(3{,}7/\varepsilon). \qquad (6.33)$$

Glotniosios trinties srities λ galima apskaičiuoti pagal (6.31) arba (6.32) lygtis. Kvadratiniuose skliaustuose esantis pirmasis dėmuo yra labai nedidelis ir jo galima nepaisyti. Tada galima naudotis tokia lygtimi:

$$1/\sqrt{\lambda} = 1{,}8 \cdot lg\, Re - 1{,}5 \,. \qquad (6.34)$$

Literatūroje pateikiama ir daugiau lygčių λ apskaičiuoti.

Slėgio aukščio nuostolių ((6.15) lygtis) sudedamoji dalis yra nuostoliai, atsirandantys nugalint vietinius kliūčių pasipriešinimus h_{vk}. Tekant skysčiui per vamzdyno susiaurėjimus ir praplatėjimus, per ventilius, sklendes ir t. t., be slėgio aukščio nuostolių, dėl trinties atsiranda negrįžtamų papildomų slėgio aukščio nuostolių. Pasikeitus judėjimo krypčiai, veikiant inercijos jėgoms, susidaro sūkuriai ir t. t.

Slėgio aukščio nuostoliai dėl vietinių kliūčių hidraulinių pasipriešinimų h_{vk}, kaip ir dėl trinties pasipriešinimų h_{tr}, išreiškiami dinaminio slėgio aukščio $w^2/(2 \cdot g)$ dalimis. Tiriamos vietinės kliūties slėgio aukščio nuostolių santykis su dinaminio slėgio aukščiu vadinamas vietinės kliūties koeficientu ξ:

$$\xi = h_{vk} / \left[w^2/(2 \cdot g) \right]. \qquad (6.35)$$

Kiekvienos vietinės kliūties sukelti slėgio aukščio nuostoliai apskaičiuojami taip:

$$h_{vk} = \xi \cdot \left[w^2/(2 \cdot g) \right]. \qquad (6.35a)$$

Tiriamosios vamzdynų sistemos vietinių kliūčių slėgio aukščio nuostoliai yra lygūs atskirų kliūčių nuostolių sumai:

$$h_{vk} = \xi_1 \cdot w^2/(2 \cdot g) + \xi_2 \cdot w^2/(2 \cdot g) + ... + \xi_n \cdot w^2/(2 \cdot g) = \\ = \sum \xi \cdot w^2/(2 \cdot g). \qquad (6.36)$$

Paprastai vietinių kliūčių koeficientų vertės nustatomos eksperimentiškai. Projektuojant vamzdynus, vidutinės vietinių kliūčių koeficientų vertės parenkamos iš žinynų pagal kliūties kilmę ir ją apibūdinančio parametro vertę (pvz., įtekėjimo į vamzdį $\xi = 0{,}5$; ventilio $\xi = 4...11$; atšakos $\xi = 0{,}14$; staigaus posūkio $\xi = 1{,}1...1{,}3$ ir t. t.).

Tada bendri slėgio aukščio nuostoliai h_n gali būti apskaičiuojami taip:

$$h_n = h_{tr} + h_{vk},$$

$$h_n = \zeta \cdot w^2/(2 \cdot g) + \sum \xi \cdot w^2/(2 \cdot g) = (\zeta + \sum \xi) \cdot w^2/(2 \cdot g) \qquad (6.37)$$

arba

$$h_n = (\lambda \cdot L/d + \sum\xi) \cdot w^2/(2 \cdot g) = \sum\zeta \cdot w^2/(2 \cdot g); \qquad (6.37a)$$

čia $\sum\zeta = \zeta + \sum\xi$; h_n matuojama metrais skysčio stulpo ir nepriklauso nuo skysčio cheminės kilmės ir sudėties.

Slėgio nuostolius galima apskaičiuoti taip:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h_n = (\lambda \cdot L/d + \sum\xi) \cdot \rho \cdot w^2/2. \qquad (6.38)$$

Cheminės technologijos aparatų hidraulinio pasipriešinimo skaičiavimas beveik nesiskiria nuo anksčiau išnagrinėto vamzdynų hidraulinio pasipriešinimo skaičiavimo. Paprastai didžiausią bendrų slėgio aukščio nuostolių aparatuose dalį sudaro slėgio aukščio nuostoliai dėl vietinių kliūčių, kadangi pramoniniai aparatai dažniausiai būna ne tuščiaviduriai, o pripildyti įvairių medžiagų (granulių, įkrovos ir t. t.) ir aparato elementų (kontaktinių lėkščių, maišiklių ir t. t.), kurie daug kartų keičia tekančių dujų ir skysčio srauto judėjimo kryptį ir srauto skerspjūvį. Šiomis sąlygomis daug mažesnės ir kritinės *Re* vertės. Pvz., aparatų su įkrova Re_{kr} vertė yra mažesnė už vienetą, o tiesių glotnių vamzdžių $Re_{kr} = 2300$.

6.5. Vamzdynų ir aparatų skersmens skaičiavimas

Technologinių procesų metu vamzdynais transportuojami skysčiai, dujos ar garai, kurie vartojami procesuose kaip žaliavos, pusgaminiai, gatavi produktai arba kaip šildymo ar aušinimo agentai. Kiekvienam procesui vykdyti naudojama nemažai vamzdynų, taigi nuo jų optimalaus skersmens priklauso proceso energijos sąnaudos ir technologinių linijų gamybos ir eksploatavimo investicijos. Projektuojant vamzdynus, būna žinomi jų ilgiai, jais transportuojamų skysčių arba dujų debitai, o reikia apskaičiuoti vamzdynų skersmenis ir tiems skysčiams arba dujoms pernešti reikalingas energijos sąnaudas.

Vamzdynų skersmeniui apskaičiuoti naudojama debito lygtis $V_s = w \cdot \pi \cdot d^2/4$. Norint iš šios lygties išreikšti vamzdžio skersmenį *d*, reikia žinoti arba pasirinkti srauto greitį *w*:

$$d = \sqrt{4 \cdot V_s/(\pi \cdot w)}. \qquad (6.39)$$

Srauto greitis vamzdyne yra vienintelis dydis, nuo kurio priklauso vamzdžio skersmuo. Didinant srauto greitį, mažėja vamzdyno skersmuo, o kartu ir jo įrengimo ir remonto kaina. Tačiau mažėjant vamzdžio skersmeniui didėja slėgio aukščio sąnaudos skysčiui transportuoti, todėl brangsta vamzdyno eksploatacija. Taigi racionaliausia naudoti optimalaus skersmens vamzdynus, kurių įrengimo ir eksploatacijos sąnaudos mažiausios. Tokius vamzdynus galima parinkti tik turint techninių ekonominių skaičiavimų rezultatus.

Cheminių aparatų skersmuo skaičiuojamas taip pat kaip ir vamzdynų – pagal (6.39) lygtį, o hidraulinis pasipriešinimas – pagal (6.14) ir (6.37) lygtis. Tačiau parinkti srauto greitį w aparatuose apsunkina nemaža aplinkybių, specifinių kiekvienai aparatų grupei. Kadangi srauto greitis turi esminę įtaką šilumos ir masės mainams, tai jo parinkimas turi būti glaudžiai susijęs su tame aparate vykdomo proceso skaičiavimu. Tuo ir skiriasi srauto greičio cheminiuose aparatuose parinkimas ir jų skersmens skaičiavimas nuo analogiškų vamzdynų skaičiavimų.

Vamzdynais transportuojamų dujų tankis visą laiką mažėja, nes dėl slėgio nuostolių mažėja jų srauto slėgis. Dėl to didėja dujų srauto greitis. Esant palyginti nedideliems slėgių skirtumams (kas būdinga vidaus transportui), vamzdynams skaičiuoti galima be didesnės paklaidos naudoti lygtis, išvestas nespūdiems skysčiams, pakeičiant jose w ir ρ dydžius vidutinėmis visam vamzdyno ilgiui greičio ir tankio vertėmis w_{vid} ir ρ_{vid}.

Apytiksliams vamzdynų, taip pat ir antgalių bei kitų aparatų elementų skersmens skaičiavimams galima naudoti eksperimentiškai nustatytus skysčių ir dujų judėjimo greičius. Jie taip pat yra pateikti žinynuose ir 6.1 lentelėje.

6.1 lentelė. Optimalūs agentų greičiai vamzdžiuose

Judantysis agentas	Greitis, m/s
Nedidelės klampos skystis (iki 0,01 Pa·s), transportuojamas siurbliais	0,5...3
Didelės klampos skystis (> 0,01 Pa·s), transportuojamas siurbliais	0,2...1
Skystis, tekantis savitaka	0,1...0,5
Nedidelio slėgio (apie 10 kPa) dujos	8...15
Padidinto slėgio dujos	15...25
Sotieji garai	15...25
Perkaitintieji garai	20...50

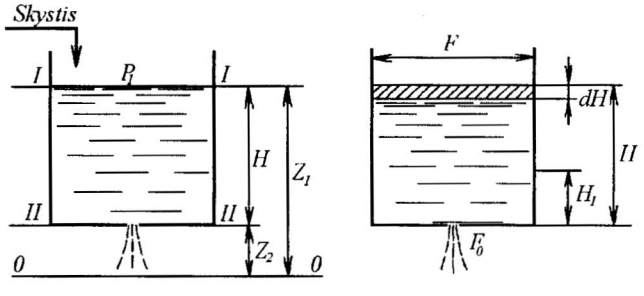
6.6. Skysčių ištekėjimas pro angas ir antgalius

Skystis iš rezervuaro pro angas ir antgalius išteka dėl hidrostatinio slėgio rezervuare. Skystis gali ištekėti, esant pastoviam arba kintamam jo lygiui rezervuare. Tekant skysčiui pro angą indo dugne, esant pastoviam skysčio aukščiui rezervuare H, ištekančio skysčio debitui V_s apskaičiuoti pasinaudosime 6.8 pav., *a*. Tariama, kad rezervuaras atviras ir skysčio paviršių veikia atmosferos slėgis, t. y. $p_1 = p_2$ ir $F >> F_0$. Tada $w_2 >> w_1$. (F ir F_0 – atitinkamai rezervuaro ir angos skerspjūvio plotai, m^2; w_1 ir w_2 – srauto greičiai inde ir angoje, m/s.)

Skerspjūviams *I–I* ir *II–II* užrašoma Bernulio lygtis:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2 \cdot g} + h_n = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + (1 + \zeta) \cdot \frac{w_2^2}{2 \cdot g};$$

čia $h_n = \zeta \cdot w_2^2/(2 \cdot g)$; ζ – pasipriešinimo koeficientas, įvertinantis slėgio aukščio nuostolius angoje.



6.8 pav. Skysčio debito (*a*) ir ištekėjimo iš rezervuaro trukmės (*b*) nustatymo schema

Kadangi $w_2 >> w_1$, tai tekėjimo greitis w_1 nevertinamas ir gaunama tokia ištekėjimo greičio išraiška:

$$w_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H/(1+\zeta)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}/\sqrt{1+\zeta}\,. \qquad (6.40)$$

Pažymėjus $1/\sqrt{1+\zeta} = \varphi$, gaunama:

$$w_2 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}\,. \qquad (6.40a)$$

Dydis φ vadinamas ištekėjimo greičio koeficientu ir parodo realaus ir teorinio ištekėjimo greičių santykį, todėl visada $\varphi < 1$. Dažniausiai jis būna 0,95...0,99 ir priklauso nuo sienelės storio.

Iš plonų sienelių rezervuaro ištekančio skysčio čiurkšlė susispaudžia. Labiausiai ji susiaurėja (čiurkšlės skerspjūvio plotas $F_{čr}$ būna mažiausias) pusės angos skersmens atstumu nuo angos centro. Santykis $F_{čr}/F_0 = \varepsilon$ vadinamas čiurkšlės susiaurėjimo koeficientu. Tada skysčio debitas

$$V_s = w_2 \cdot F_{čr} = \varphi \cdot F_0 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}\,,$$

arba

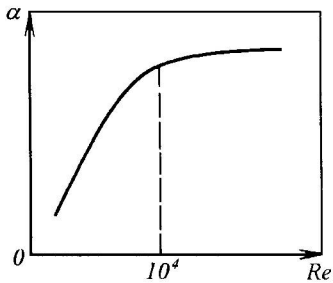
$$V_s = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}\,. \qquad (6.41)$$

Dydis $\alpha = \varepsilon \cdot \varphi$ vadinamas debito koeficientu. Jis parodo realaus ir teorinio debitų santykį. Debito koeficientas priklauso nuo *Re* (6.10 pav.), angos formos, skysčio fizikinių savybių. Kai vanduo arba kiti panašios klampos

skysčiai teka pro skritulio formos angas, galima imti $\alpha \approx 0{,}62$ (jei $Re > 10000$).

Iš (6.41) lygties matyti, kad skysčio, ištekančio pro plonasienę angą indo dugne, debitas nepriklauso nuo indo formos. Šią lygtį galima naudoti ir skaičiuojant pro plonasienę angą šoninėje indo sienelėje ištekančio skysčio debitą (H šiuo atveju yra atstumas nuo viršutinio skysčio lygio iki angos ašies).

Debito koeficientas didėja skysčiui ištekant pro trumpą cilindrinį vamzdelį, vadinamą antgaliu, kurio ilgis 3...4 kartus didesnis už skersmenį. Antgaliai pagal formą skirstomi į cilindrinius ir kūginius – konoidinius (siaurėjančius arba platėjančius), o pagal tvirtinimą prie sienelės – į vidinius ir išorinius. Čiurkšlė, kuri buvo susiaurėjusi skysčiui ištekant iš indo, cilindriniame antgalyje suspėja išsiplėsti ir išteka užpildžiusi visą jo skerspjūvį. Čiurkšlei siaurėjant, antgalyje susidaro vakuumas, kuris didžiausią skaitinę vertę pasiekia 0,5 skersmens atstumu nuo antgalio pradžios. Dėl susidariusio vakuumo gerokai sumažėja hidrauliniai nuostoliai. Parinkus specialios formos antgalius, pvz., kūginius, galima padidinti skysčio ištekėjimo greitį daugiau kaip 30 procentų. Cilindrinės formos antgaliuose α yra 0,80, o kūginiuose iki 0,99.



6.9 pav. Debito koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso kriterijaus

Kintant slėgio aukščiui arba skysčio aukščiui inde H (6.8 pav., *b*), keičiasi skysčio ištekėjimo greitis, t. y. vyksta nenuostovusis skysčio judėjimas ir jam netaikoma Bernulio lygtis. Norint nustatyti skysčio ištekėjimo iš indo trukmę, kai kinta skysčio lygis jame, visa proceso trukmė padalijama į be galo mažus trukmės intervalus, ir kiekviename iš šių intervalų procesas laikomas stacionariu. Per be galo mažą trukmės intervalą $d\tau$ lygis inde sumažės be galo mažu dydžiu dH. Esant pastoviam indo skerspjūvio plotui F, inde per trukmę $d\tau$ skysčio kiekis sumažėja dydžiu dV_s, kuris apskaičiuojamas taip:

$$dV = -F \cdot dH .$$

Dešinioji lygties pusė rodo, kad inde skysčio lygis H žemėja. Pagal (6.41) lygtį per tą pačią trukmę $d\tau$ iš indo ištekančio skysčio tūris

$$dV_s = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot d\tau .$$

Esant nenutrūkstamam srautui, pagal dvi pastarąsias lygtis apskaičiuoti tūriai turi būti lygūs. Tada

$$-F \cdot dH = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot d\tau .$$

Iš šios lygties išreiškiama $d\tau$:

$$d\tau = -F \cdot dH / \left(\alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}\right).$$

Suintegravus šią lygtį pagal trukmę nuo *0* iki τ bei skysčio aukštį inde nuo H iki *0* ir tarus, kad debito koeficientas α yra pastovus (*Re > 100000*), gaunama:

$$\int_0^{\tau} d\tau = -\frac{1}{\alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \int_H^0 F \cdot H^{-1/2} \cdot dH = \\ = \frac{1}{\alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \int_0^H F \cdot H^{-1/2} \cdot dH . \qquad (6.42)$$

Kai $F = const$, (6.42) lygtis tampa tokia:

$$\tau = 2 \cdot F \cdot \sqrt{H} / \left(\alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g}\right). \qquad (6.43)$$

Jeigu reikia nustatyti skysčio ištekėjimo iš indo trukmę, kai jo lygis pakinta nuo H iki H_1 (6.9 pav., *b*), (6.42) lygtį reikia integruoti nuo H iki H_1:

$$\tau = 2 \cdot F \cdot \left(\sqrt{H} - \sqrt{H_1}\right) / \left(\alpha \cdot F_0 \sqrt{2 \cdot g}\right). \qquad (6.44)$$

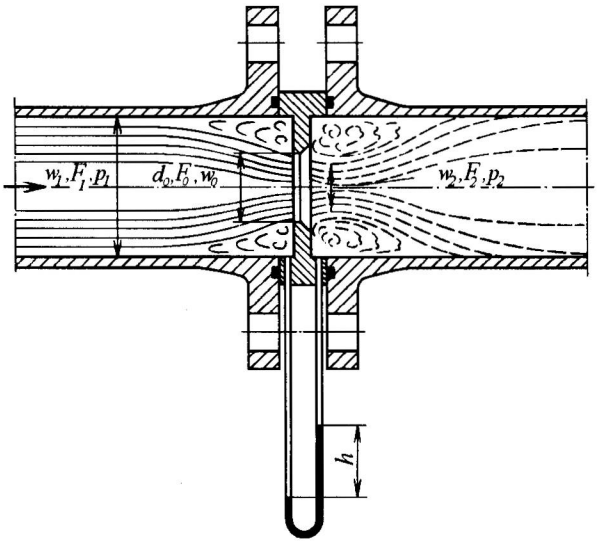
Kai $F \neq const$, pvz., horizontalių cisternų, tai, sprendžiant (6.42) lygtį, reikia atsižvelgti į priklausomybę $F = f(H)$.

6.7. Skysčio ir dujų debito matavimas

Skysčio ir dujų srautų debitų matavimas yra svarbus techninis uždavinys. Todėl yra sukurta nemaža debito matavimo metodų. Tarp jų yra ir tokių, kai nereikia srauto sutrikdyti (elektriniai, optiniai ir kt.). Plačiai technologiniuose procesuose taikomas hidrodinaminis debito matavimo metodas. Jo pagrindą sudaro slėgio sumažėjimo srauto skerspjūvyje, aptekant specialius elementus, matavimas. Matuojant slėgių prieš tokį elementą ir už jo skirtumą ir naudojant Bernulio lygtį, apskaičiuojamas srauto debitas. Tokiu principu veikiantys prietaisai vadinami droseliniais. Prie jų priskiriamos matavimo diafragmos, mata-

vimo tūtos, Venturio vamzdis. Naudojant droselinius prietaisus, matuojamas vidutinis srauto greitis.

Dažniausiai debitas matuojamas matavimo diafragma (6.10 pav.). Diafragmą *1* sudaro plona plokštelė, turinti angą centre. Plokštelė įdėta tarp flanšų su žiedo formos kameromis *2*. Slėgių prieš diafragmą ir už jos skirtumas matuojamas diferenciniu manometru *3*. Jį sudaro *U* formos vamzdelis, pripildytas skysčio, kuris nesimaišo su transportuojamu agentu ir kurio tankis yra didesnis nei transportuojamo agento.



6.10 pav. Debito matavimo diafragma:
w_1,w_0, w_2 – vidutinis srauto greitis vamzdyje, diafragmos angos ir čiurkšlės siauriausioje vietoje, m/s; F_1, F_0, F_2 – vamzdžio diafragmos angos ir čiurkšlės siauriausios vietos skerspjūvio plotas, m^2; d_1 ir d_0 – vamzdžio bei diafragmos siauriausios dalies skersmuo, m; p_1 ir p_2 – slėgis saute prieš diafragmą ir už jos

Debitui vamzdyje apskaičiuoti parašome Bernulio lygtį dviem horizontalaus vamzdyno skerspjūviams, kuriuose slėgių aukščių skirtumas h matuojamas diferenciniu manometru *3*:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2 \cdot g} + h_n = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2 \cdot g} \cdot (1 + \zeta), \quad (6.45)$$

arba

$$\frac{w_2^2}{2 \cdot g} \cdot (1 + \zeta) - \frac{w_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} = h; \qquad (6.45a)$$

čia h – diferenciniame manometre esančio skysčio slėgio aukščių skirtumas;
ζ – diafragmos pasipriešinimo koeficientas.

Srauto greitis diafragmos angoje w_2 apskaičiuojamas pagal (6.45a) lygtį:

$$w_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} / \sqrt{1 + \zeta} \; . \qquad (6.45b)$$

Debitas apskaičiuojamas pagal (6.41) lygtį:

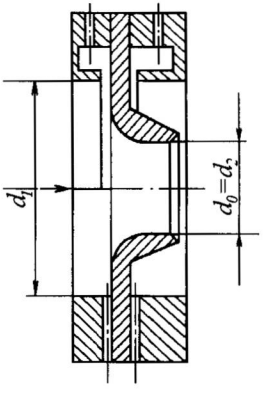
$$V_s = \alpha_d \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{\rho_m - \rho}{\rho_m}} \; . \qquad (6.46)$$

Diafragmos debito koeficientas α_d priklauso nuo Reinoldso kriterijaus Re ir diafragmos angos d_0 ir vamzdyno vidinio d_1 skersmenų santykio:

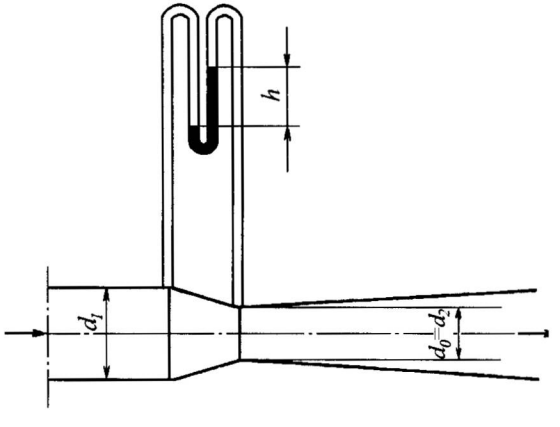
$$\alpha_d = f(Re, d_0/d_1). \qquad (6.46a)$$

Paprastai α_d parenkamas iš žinynų.

Vietoj matavimo diafragmos galima naudoti matavimo tūtą (6.11 pav.), kuri atitinka antgalį su glotniai suapvalinta įtekėjimo ir cilindrine ištekėjimo anga. Matavimo tūtos hidraulinis pasipriešinimas mažesnis negu matavimo diafragmos, tačiau jos konstrukcija sudėtingesnė.



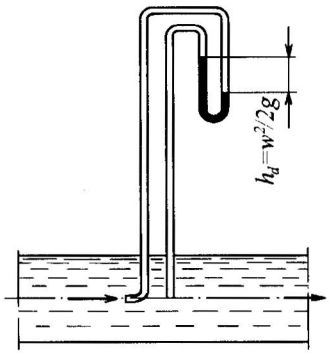
6.11 pav. Matavimo tūta



6.12 pav. Venturio vamzdis

Dar vienas droselinis debito matavimo prietaisas yra Venturio vamzdis (6.12 pav.). Jį sudaro dvi kūginės dalys: pirmoji siaurėjanti (apie 11 laipsnių kampu, vadinama kompuzoriumi), antroji platėjanti (apie 3 laipsnių kampu, vadinama difuzoriumi). Kadangi srauto skerspjūvis kinta glotniai, tai Venturio vamzdžio hidraulinis pasipriešinimas daug mažesnis negu matavimo diafragmos ir tūtos.

Srauto debitą matuojant matavimo tūta arba Venturio vamzdžiu, skaičiuojama pagal (6.46) lygtį. Joje α_d yra atitinkamų prietaisų debito koeficientas, kurių vertės parenkamos iš žinynų. Greičiams matuoti srauto skerspjūvyje galima panaudoti pjezometrinį Pito ir Prandtlio vamzdelį (6.13 pav.).



6.13 pav. Pito ir Prandtlio vamzdelis

Vamzdelį į srautą įleidžiame taip, kad jo lenktas galas būtų nukreiptas prieš srauto judėjimo kryptį. Tada kairioji vamzdelio dalis matuoja statinio ir dinaminio (greičio) slėgių aukščių sumą, o dešinioji – tik statinio slėgio aukštį. Visas diferencinis manometras rodys dinaminio slėgio aukštį $h_d = w^2/(2 \cdot g)$ matavimo taške. Iš šios lygties:

$$w = \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{\rho_m - \rho}{\rho_m}} . \qquad (6.47)$$

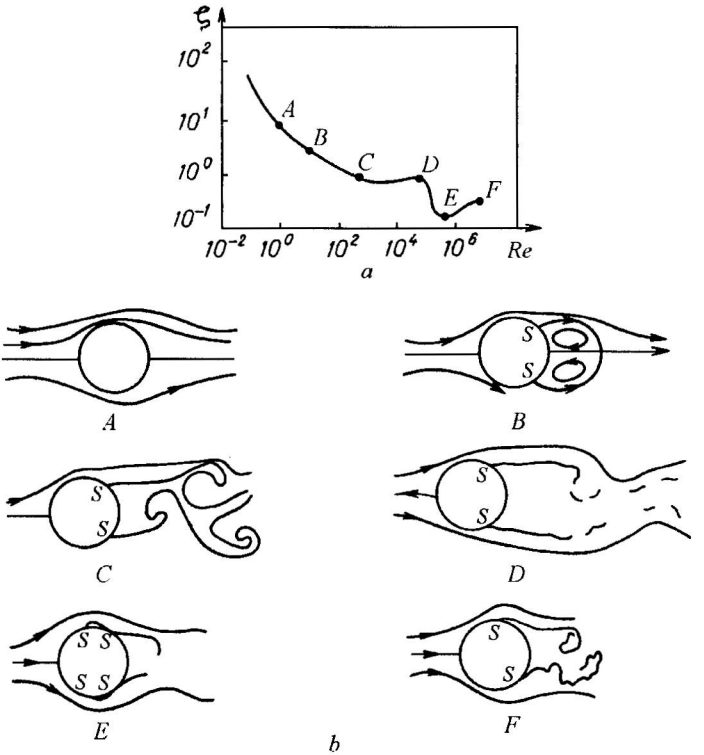
Dažniausiai Pito ir Prandtlio vamzdelis statomas vamzdžio ašyje ir juo matuojamas ašinis (maksimalus) greitis. Srauto vidutiniam greičiui nustatyti panaudojama (6.46) lygtis, į kurią vietoj debito koeficiento įrašomas pataisos koeficientas α_p:

$$V_s = F_1 \cdot \alpha_p \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_d \cdot \frac{\rho_m - \rho}{\rho_m}} ; \qquad (6.48)$$

čia F_1 – vamzdyno skerspjūvio plotas, m^2; α_p – pjezometrinio vamzdelio pataisos koeficientas, parenkamas žinynuose $\alpha_p = f(Re)$.

6.8. Skysčių aptekėjimas apie kietuosius kūnus

Su kietųjų kūnų aptekėjimu susiduriama daugelyje cheminės technologijos procesų (maišymo, džiovinimo ir t. t.). Tokių procesų tyrimas ir skaičiavimas priskiriamas prie išorinių hidrodinamikos uždavinių (anksčiau nagrinėtas skysčių tekėjimas kanalais priskiriamas prie vidinių hidrodinamikos uždavinių). Aptekėjimu suprantamas srauto judėjimas kietojo kūno atžvilgiu, nesvarbu, ar tas kūnas yra ramybės būsenos, ar juda.



6.14 pav. Skersinio skysčio srauto aptekėjimas apie cilindrą:
a – pasipriešinimo koeficiento ζ priklausomybė nuo Reinoldso kriterijaus,
b – cilindro aptekėjimo pobūdis. Kiti paaiškinimai yra tekste

6.14 pav., *a*, pavaizduota kūno fasadinio paviršiaus pasipriešinimo koeficiento ζ priklausomybė nuo Reinoldso kriterijaus *Re*. Fasadiniu paviršiumi vadinamas kūno paviršius, kurio kryptimi juda srautas. Tyrimais nustatyta,

kad, esant nedidelėms *Re* vertėms, kreivės $\zeta = f(Re)$ forma yra tokia pat, kaip skysčiui judant vamzdynuose (6.7 pav.).

6.14 pav., *b*, pavaizduotas schemiškas bendras skysčio judėjimo arti cilindro išorinio paviršiaus pobūdis, esant įvairioms *Re* vertėms. Kiekvienas paveikslas vaizduoja momentinį skysčio judėjimo pobūdį, kurį galima gauti naudojant trasiklį (pvz., dažiklio čiurkšlę). Analizuojant šiuos paveikslus, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad sudėtingą kietojo kūno aptekėjimo pobūdį jie aiškina supaprastintai ir kad tekėjimas yra trimatis, ko plokštumoje negalima atvaizduoti.

Esant mažoms *Re* vertėms ($Re < 2$; 6.14 pav., *a*, atkarpa iki taško *A*), cilindrą aptekantis srautas yra stacionarus bei laminarinis, nors ir asimetriškas išilgine kryptimi cilindro atžvilgiu, kadangi cilindras sulėtina tekėjimą. Didėjant Reinoldso kriterijui (atkarpa *AB*, 6.14 pav., *a*), srautas tampa dar simetriškesnis. Už cilindro susidaro sūkuriai ir pėdsakas (6.14 pav., *b*, – režimas *B*), t. y. atsiranda sulėtinto srauto sritis, kuri pradeda svyruoti iš vienos pusės į kitą. Didėjant *Re*, pėdsakas siaurėja, o kartu mažėja ir fasado pasipriešinimo koeficientas ζ.

Toliau didėjant Reinoldso kriterijui (iki $Re \approx 500$; atkarpa *BC*, 6.15 pav., *a*), pėdsakas turi dvigubą tolygiai išsidėsčiusių sūkurių eilę (Karmano sūkurių kelias). Skaičiuojant procesus, *Re* kitimo sritis nuo *2* iki *500* siūlo sujungti į vieną pereinamąją sritį arba pereinamąjį režimą.

Kai $Re > 500$, atsiranda turbulentinis (automodelinis *Re* atžvilgiu) režimas (atkarpa *CD*, 6.14 pav., *a*). Šiuo atveju srautas, tiesiogiai susiliečiantis su cilindru, faktiškai yra stacionarus. Į dešinę nuo cilindro yra du sluoksniai, sudarantys sūkurius, kurie yra nestabilūs ir virsta smulkiais netvarkingos struktūros dariniais, tipiškais turbulencijai ($Re = 2 \cdot 10^5$; režimas *D*, 6.15 pav., *b*). Toks turbulentinis tekėjimas atsiranda tada, kai nėra tiesioginės ribos tarp kietųjų kūnų paviršiaus ir srauto.

Didelę įtaką turi tai, kokiu būdu užsisukęs srautas palieka kūno paviršių. Nuo to priklauso tekėjimas už cilindro ir cilindro fasados pasipriešinimas. Pasienio sluoksnyje skystis, sustabdytas paviršiaus trinties, nesugeba judėti išilgai paviršiaus prieš didėjantį slėgį iš cilindro dešiniosios pusės, todėl atitrūksta nuo jo. Taigi už kūno esantis pasienio sluoksnio skystis nustoja judėti pagrindine kryptimi. Taškai, kuriuose pasienio sluoksnis atitrūksta nuo kūno paviršiaus, 6.14 pav., *b*, pažymėti raide *S*. Už atitrūkimo taško nuo kūno paviršiaus tekėjimo kryptis pasikeičia į priešingą, kadangi skystis atitrūkimo taško link juda tuo pačiu metu ir abiem kryptimis. Tarp atitrūkusio sūkurių sluoksnio ir kietojo kūno paviršiaus yra palyginti lėta recirkuliacinio tekėjimo zona, kuri išsiplečia už cilindro. Šie sūkuriniai tekėjimai ir sluoksniai, didėjant Reinoldso kriterijui, tampa ne tokie nuostovūs.

Panagrinėsime pasienio sluoksnio elgseną, esant tam tikroms *Re* vertėms už taško *D*. Kreivės atkarpoje *DE* už taško *D* atitrūkimo pobūdis tampa sudė-

tingesnis: pasienio sluoksnis dešinėje cilindro pusėje vėl prisijungia prie paviršiaus ($Re \approx 10^6$; režimas *E*, 6.14 pav., *b*). Sritis tarp laikinai atsiskyrusio sluoksnio ir kūno paviršiaus sudaro laminarinę atitrūkimo zoną (burbulą), kur recirkuliacinis tekėjimas silpnas. Šiame *Re* kitimo diapazone pėdsako ir pasislinkusių sluoksnių turbulencija plinta kryptimi, priešinga pagrindinio srauto krypčiai, t. y. nuo cilindro paviršiaus. Pasienio sluoksnis už atitrūkimo burbuliuko tampa turbulentinis, ir galutinis atitrūkimas yra turbulentinio pasienio sluoksnio atitrūkimas. Būtent perėjimo atsiradimas pačiame pasienio sluoksnyje yra staigaus fasadinio pasipriešinimo koeficiento mažėjimo priežastis (6.14 pav., *a*). *Re* verčių srityje, artimoje kritinei *Re* vertei, pasipriešinimo koeficientas ryškiai sumažėja (6.14 pav., *a*, taškas *E*), tekėjimo vaizdas priklauso nuo užtekančio srauto turbulencijos lygio ir paviršiaus šiurkštumo.

Toliau didėjant *Re* (kreivė *EF*) išnyksta atitrūkimo burbuliukai ir išsiplečia pasienio sluoksnio turbulencinė dalis; fasadinio pasipriešinimo koeficientas iš naujo lėtai didėja. Atitrūkstant turbulentiniams pasienio sluoksniams, atsiranda pasislinkusių sluoksnių, kurie patys yra nepastovūs ir dėl to pėdsake toliau didėja turbulencija.

Analogiškas vaizdas gaunamas skysčiui aptekant rutulius.

Remiantis analizės duomenimis, galima padaryti išvadą, kad hidraulinis skysčio aptekamo kūno pasipriešinimas priklauso nuo trinties pasipriešinimo ir tolygiai paviršių veikiančio slėgio pasipriešinimo. Trinties pasipriešinimas didėja prasidėjus pereinamajam režimui. Slėgio pasipriešinimas priklauso nuo atitrūkimo taškų išsidėstymo ir, aptekant cilindrą arba rutulį, gali mažėti, pasibaigus pereinamajam tekėjimo režimui. Suminis efektas pereinamojo tekėjimo metu priklauso nuo kūno formos, kadangi trinties pasipriešinimas yra pagrindinė gerai aptekamų kūnų, pvz., lėktuvo sparnų, dedamoji, o slėgio pasipriešinimas reikšmingas blogai aptekamiems kūnams, pvz., cilindrams.

Skysčių aptekamų kietųjų kūnų hidraulinio pasipriešinimo teorinis skaičiavimas gana sudėtingas. Todėl uždaviniui spręsti naudojami eksperimentiniai duomenys ir panašumo teorija. Skysčiui aptekant kietąjį kūną atsiradusią pasipriešinimo jėgą *R* padaliję iš kietojo kūno projekcijos ploto *F* plokštumoje, statmenoje jo judėjimo krypčiai, gausime $R/S = \Delta p_n$ (čia Δp_n – slėgio nuostoliai tarp priekinės arba fasadinės ir užpakalinės kūno dalies). Nuostolių Δp_n vertę galima apskaičiuoti pagal (6.25) lygtį. Tuomet iš jos gauname:

$$R = \zeta \cdot F \cdot \rho \cdot w^2/2 . \qquad (6.49)$$

Išsprendę (6.25) lygtį ζ atžvilgiu, gauname:

$$\zeta/2 = \Delta p_n/\left(\rho \cdot w^2\right) = Eu .$$

Panašumo teorijos metodais apdorodami eksperimentinius duomenis, nustatome priklausomybę $Eu = f(Re)$. Nagrinėjant sferinių kūnų, kurių skersmuo d, aptekėjimą (6.14 pav., *a*) gaunama priklausomybė:

- esant laminariniam tekėjimo režimui ($Re < 2$),

$$\zeta = 24/Re; \tag{6.50}$$

- esant pereinamajam tekėjimo režimui ($Re = 2...500$),

$$\zeta = 18{,}5/Re^{0{,}6}; \tag{6.51}$$

- esant turbulentiniam tekėjimo režimui ($500 < Re < 2 \cdot 10^5$),

$$\zeta = 0{,}39...0{,}5. \tag{6.52}$$

Kai $Re = 2 \cdot 10^5...10^6$, susidaro pasipriešinimo krizė ir ζ sumažėja 4...5 kartus.

Iš (6.25) lygties ir pateiktų ζ verčių išplaukia, kad, esant laminariniam tekėjimui, $\Delta p_n \sim w$, esant pereinamajam tekėjimo režimui, $\Delta p_n \sim w^{1,4}$, esant turbulentiniam tekėjimo režimui, $\Delta p_n \approx w^2$.

Kūnams, kurių forma skiriasi nuo rutulio formos, pasipriešinimo koeficiento vertė didesnė ir priklauso ne tik nuo Reinoldso kriterijaus, bet ir nuo formos koeficiento Φ, t. y.

$$\zeta = f(Re, \Phi); \tag{6.53}$$

čia $\Phi = F_r/F$; F_r – rutulio, turinčio tokį pat tūrį kaip tiriamasis kūnas, paviršiaus plotas, m^2; F – tiriamojo kūno paviršiaus plotas, m^2.

Skaičiuojant Re, naudojamas ekvivalentinio rutulio skersmuo d, lygus skersmeniui rutulio, kurio tūris lygus tiriamojo kūno tūriui. Ekvivalentinis rutulio skersmuo apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$V = m/\rho_k = \pi \cdot d^3/6; \tag{6.54}$$

čia V – kūno tūris, m^3; m – tiriamojo kūno masė, kg; ρ_k – tiriamojo kūno tankis, kg/m^3.

Kietojo kūno aptekėjimo pavyzdžiu nagrinėsime rutulio formos kietojo kūno dalelės nusodinimą nejudančioje aplinkoje, veikiant sunkio jėgai.

Krintant sunkio jėgos $m \cdot g$ veikiamai m masės dalelei, jos judėjimo greitis pradžioje didėja, o po to, kai terpės pasipriešinimo jėga R tampa lygi sunkio jėgai, dalelė pradeda tolygiai judėti pastoviu greičiu, kuris vadinamas nusodinimo greičiu w_n.

Terpės pasipriešinimo jėga nepriklausomai nuo dalelės formos ir judėjimo režimo išreiškiama pasipriešinimo dėsniu ((6.49) lygtis). Kai dalelės yra rutulio formos, ši lygtis užrašoma taip:

$$R = \left(\zeta \cdot \pi \cdot d^2/4\right) \cdot \left(\rho \cdot w_n^2/2\right). \qquad (6.55)$$

Dalelės sunkio jėga skystoje arba dujinėje terpėje lygi jos svoriui šioje terpėje:

$$m \cdot g = \left(\pi \cdot d^3/6\right) \cdot g \cdot \left(\rho_k - \rho\right);$$

čia ρ_k – dalelės tankis, kg/m^3; ρ – terpės tankis, kg/m^3.

Pasiekus pusiausvyrą, $R = m \cdot g$ ir

$$\left(\zeta \cdot \pi \cdot d^2/4\right) \cdot \left(\rho \cdot w_n^2/2\right) = \left(\pi \cdot d^3/6\right) \cdot g \cdot \left(\rho_k - \rho\right); \qquad (6.56)$$

iš čia:

$$w_n = \sqrt{4 \cdot g \cdot d \cdot \left(\rho_k - \rho\right)/\left(3 \cdot \zeta \cdot \rho\right)}. \qquad (6.57)$$

Pasipriešinimo koeficientas ζ priklausomai nuo dalelės judėjimo režimo (Re) apskaičiuojamas pagal vieną iš (6.50)...(6.52) lygčių. Įrašius į (6.57) lygtį ζ vertę, apskaičiuotą pagal (6.50) lygtį, esant laminariniam tekėjimo režimui, gaunama Stokso nusodinimo lygtis:

$$w_n = d^2 \cdot g \cdot \left(\rho_k - \rho\right)/\left(18 \cdot \mu\right); \qquad (6.58)$$

čia μ – terpės dinaminė klampa, Pa·s.

Norėdami gauti apibendrintą lygtį dalelės nusodinimo greičiui apskaičiuoti, (6.57) lygties kairiąją ir dešiniąją puses padauginame iš santykio d^2/ν^2:

$$\frac{g \cdot d^3 \cdot \left(\rho_k - \rho\right)}{\nu^2 \cdot \rho} = \zeta \cdot \frac{3 \cdot w_n^2 \cdot d^2}{4 \cdot \nu^2},$$

arba

$$Ar = \zeta \cdot \left(3/4\right) \cdot Re^2. \qquad (6.59)$$

Į (6.59) lygtį įrašę ζ vertę, galime apskaičiuoti w_n, esant visiems dalelės judėjimo režimams. Apytikslę w_n vertę galima apskaičiuoti pagal Todeso lygtį:

$$Re = Ar/\left(18 + 0{,}61 \cdot \sqrt{Ar}\right). \qquad (6.59a)$$

6.9. Skysčio judėjimas per grūdinės medžiagos arba įkrovos sluoksnį

Daugelis chemijos ir maisto pramonės technologinių procesų (filtravimas, adsorbcija, absorbcija, džiovinimas ir t. t.) vyksta smulkios medžiagos arba įkrovos pripildytuose aparatuose.

6.9.1. Srauto judėjimas per nejudantį grūdinį sluoksnį

Kadangi kietos medžiagos ir įkrovos dalelės būna sudėtingos ir įvairios formos (granulės, tabletės, rutuliai, žiedai ir t. t.), tai jų sluoksniuose tuštumų suformuoti kanalai yra sudėtingos konfigūracijos. Todėl per nejudamą kietos medžiagos sluoksnį judančių dujų arba skysčių srautas tuo pačiu metu apiplauna sluoksnio atskirus elementus ir juda sudėtingos formos kanaluose. Tokio judėjimo analizė yra sudėtingas hidrodinamikos uždavinys. Skaičiavimams supaprastinti panašūs procesai priskiriami vidiniam uždaviniui; tada, remiantis (6.24) lygtimi, galima užrašyti:

$$\Delta p = \left(\lambda \cdot L/d_{ekv}\right) \cdot \left[\rho \cdot w^2/2\right]. \qquad (6.60)$$

Šioje lygtyje trinties koeficientas λ parodo ne tik trinties, bet ir vietinių kliūčių sukeltus pasipriešinimus, kurių įtaka bendram grūdinio sluoksnio pasipriešinimui Δp gali būti labai didelė. Koeficientas λ (6.60) lygtyje, skirtingai negu λ (6.24) lygtyje, yra bendrojo pasipriešinimo koeficientas, kurio vertė labai priklauso nuo grūdinės medžiagos geometrinių charakteristikų ir apskaičiuojama pagal atitinkamas empirines lygtis. Skaičiuojant Δp pagal (6.60) lygtį, sunku nustatyti grūdinės medžiagos arba įkrovos ekvivalentinį skersmenį d_{ekv}. Ypač tai pasunkėja, kai dirbama su nevienodo dydžio ir skirtingos formos dalelėmis, vadinamąja polidispersine grūdine medžiaga. Todėl d_{ekv} skaičiavimo lygtys dažnai yra suvidurkintos ir labai apytikslės. Ekvivalentinis skersmuo išreiškiamas pagrindinėmis grūdinės medžiagos charakteristikomis – savituoju paviršiumi a ir laisvuoju tūriu (poringumu) ε.

Savitasis paviršius yra 1 m^3 grūdinės medžiagos arba įkrovos paviršius. Medžiagos sluoksnio laisvo tūrio dalimi (laisvuoju tūriu arba poringumu) ε vadinamas tuštumų tarp dalelių tūrio santykis su tiriamosios medžiagos užimamu tūriu:

$$\varepsilon = \left(V - V_k\right)/V = V_0/V\ ;$$

čia V – suminis grūdinio sluoksnio užimamas tūris; V_0 – laisvasis sluoksnio tūris; V_k – grūdinio sluoksnio kietos medžiagos dalelių tūris; ε –matavimo vienetų neturintis dydis, išreiškiamas tūrio dalimis arba procentais.

Medžiagos tankį pažymime ρ_k, o piltinį tankį ρ_p ir atsižvelgdami į tai, kad $V \cdot \rho_p = V_k \cdot \rho_k$, poringumą apskaičiuojame taip: $\varepsilon = 1 - \rho_p / \rho_k$.

Poringumas nemažai priklauso nuo medžiagos pakrovimo būdo, taip pat nuo aparato skersmens D ir dalelių skersmenis d santykio. Laisvai supylus rutulio formos daleles, sluoksnio poringumas dažniausiai būna $\varepsilon \approx 0{,}4$, tačiau jis gali kisti nuo 0,35 iki 0,45 ir daugiau.

Kai $D/d < 10$, pasireiškia vadinamasis pasienio efektas, t. y. sluoksnio poringumas ε prie sienelės, palyginti su poringumu aparato centrinėje dalyje, padidėja. Dėl to greitis netolygiai pasiskirsto aparato skerspjūvyje. Prie sienelės greitis gali būti daug didesnis, todėl dalis srauto peršoka nepakankamai ilgai kontaktavusi su grūdinio sluoksnio dalelėmis. Toks reiškinys dažnai vadinamas aplenkimu.

Grūdinio sluoksnio ekvivalentinis skersmuo gali būti apskaičiuotas pagal lygtį, analogišką (3.10) lygčiai:

$$d_{ekv} = 4 \cdot F_k / \Pi_k \; ; \qquad (6.61)$$

čia F_k ir Π_k – atitinkamai grūdinėje medžiagoje arba įkrovoje esančių kanalų skerspjūvio plotas, m^2, ir drėkinamas perimetras, m.

Dydžius F_k ir Π_k galima apskaičiuoti taip. Grūdinio sluoksnio tūris aparate $V = F \cdot H$ (čia F – aparato skerspjūvio plotas su grūdiniu sluoksniu, kurio aukštis H). Tada $V_k = F \cdot H \cdot (1 - \varepsilon)$, $V_0 = F \cdot H \cdot \varepsilon$, o dalelių paviršius S_d lygus jų sudarytų kanalų paviršiui ir apskaičiuojamas taip: $S_d = V \cdot a = F \cdot H \cdot a$ (šioje lygtyje nepaisome dalelių paviršiaus sumažėjimo dėl jų tarpusavio lietimosi). Dėl kreivumo kanalų ilgis $L_k > H$.

Santykis L_k / H yra kanalų kreivumo koeficientas α_k ($\alpha_k > 1$). Tada grūdinio sluoksnio laisvasis tūris gali būti išreikštas taip: $V_0 = F \cdot H \cdot \varepsilon = F_k \cdot n_k \cdot L_k$. Iš čia gauname:

$$F_k = F \cdot H \cdot \varepsilon / (F_k \cdot \Pi_k \cdot L_k) = F \cdot \varepsilon / (\alpha_k \cdot n_k); \qquad (6.62)$$

čia n_k – kanalų skaičius grūdinės medžiagos arba įkrovos sluoksnyje.

Atsižvelgiant į tai, kad $S_d = F \cdot H \cdot a = \Pi_k \cdot L_k \cdot n_k$, dydį Π_k galima išreikšti taip:

$$\Pi_k = F \cdot H \cdot a / (L_k \cdot n_k) = F \cdot a / (\alpha_k \cdot n_k). \qquad (6.63)$$

Tada grūdinės medžiagos kanalų ekvivalentinis skersmuo

$$d_{ekv} = 4 \cdot F_k / \Pi_k = 4 \cdot \varepsilon / a. \qquad (6.64)$$

Dydį d_{ekv} galima išreikšti grūdinės medžiagos sluoksnio dalelių parametrais. Jeigu 1 m^3 grūdinės medžiagos sluoksnyje yra n dalelių, kurių kiekvienos tūris v_d, o paviršiaus plotas S_d, tai galima užrašyti:

$$v_d = (1-\varepsilon)/n = \pi \cdot d^3/6; \qquad S_d = a/n = \pi \cdot d^3 \cdot \Phi;$$

čia d – ekvivalentinio to paties tūrio kaip sluoksnio dalelė rutulio skersmuo, m; Φ – formos koeficientas, apskaičiuojamas pagal (6.53) lygtį (rutulio $\Phi = 1$). Įvairių formų dalelių Φ galima rasti žinynuose, pvz., kubo $\Phi = 0{,}806$, cilindro, kurio aukštis 10 kartų didesnis už spindulį, $\Phi = 0{,}69$.

Tada:

$$S_d/v_d = a/(1-\varepsilon) = 6/(\Phi \cdot d); \quad a = 6 \cdot (1-\varepsilon)/(\Phi \cdot d). \qquad (6.65)$$

Į (6.64) lygtį įrašę išreikštą a vertę, gauname naują lygtį grūdinės medžiagos sluoksnio kanalų ekvivalentiniam skersmeniui apskaičiuoti:

$$d_{ekv} = 2 \cdot \Phi \cdot \varepsilon \cdot d/[3 \cdot (1-\varepsilon)]. \qquad (6.66)$$

Į (6.60) lygtį įeina dydis w – srauto greitis grūdinės medžiagos sluoksnio kanaluose, kurį sudėtinga nustatyti. Todėl jis pakeičiamas vadinamuoju fiktyviuoju greičiu w_0, t. y. srauto greičiu, apskaičiuotu tuščio aparato skerspjūviui. Fiktyvusis greitis apskaičiuojamas pagal debito lygtį $V_s = w_0 \cdot F$. Esant nuostoviajam srauto judėjimo režimui, $F \cdot w_0 = F \cdot w \cdot \varepsilon$ (čia $F \cdot \varepsilon = V_0/H = F \cdot H \cdot \varepsilon/H$ – suminis kanalų skerspjūvio plotas, m^2). Tada:

$$w = w_0 \cdot \varepsilon. \qquad (6.67)$$

Užrašydami (6.67) lygtį, tarėme, kad $L_k = H$, todėl skaičiuojant hidraulinį grūdinės medžiagos arba įkrovos sluoksnio pasipriešinimą paklaida nebūna didelė. Perrašysime (6.60) lygtį, atsižvelgdami į anksčiau užrašytas (6.61)...(6.67) priklausomybes. Tada po pertvarkymo gausime:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{H}{d_{ekv}} \cdot \frac{\rho \cdot (w_0/\varepsilon)^2}{2} = \lambda \cdot \frac{H}{2 \cdot \Phi \cdot \varepsilon \cdot d/[3 \cdot (1-\varepsilon)]} \cdot \frac{\rho \cdot (w_0/\varepsilon)^2}{2},$$

arba

$$\Delta p = \frac{3 \cdot (1-\varepsilon)}{2 \cdot \varepsilon^3 \cdot \Phi} \cdot \lambda \cdot \frac{H}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_0^2}{2}. \qquad (6.68)$$

Pasipriešinimo koeficientas λ yra srauto judėjimo per grūdinės medžiagos arba įkrovos sluoksnį hidrodinaminio srauto tekėjimo režimo funkcija, t. y. $\lambda = f(Re)$. Reinoldso kriterijus šiuo atveju apskaičiuojamas pagal modifikuotą lygtį, kuri gaunama įrašius d_{ekv} išraišką, apskaičiuotą pagal (6.66) lygtį:

$$Re = w \cdot d_{ekv} \cdot \rho / \mu = w_0 \cdot 4 \cdot \varepsilon \cdot \rho / (\varepsilon \cdot a \cdot \mu) = 4 \cdot w_0 \cdot \rho / (a \cdot \mu), \quad (6.69)$$

arba

$$Re = \frac{w \cdot d_{ekv} \cdot \rho}{\mu} = \frac{2 \cdot \Phi}{3 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot \frac{w_0 \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{2 \cdot \Phi}{3 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot Re_0 ; \quad (6.70)$$

čia Re_0 – Reinoldso kriterijus, apskaičiuotas naudojant w_0 ir d.

Skysčiui tekant per gūdinės medžiagos arba įkrovos sluoksnį, turbulencija atsiranda esant mažesnėms *Re* vertėms, negu tekant vamzdžiuose (pvz., laminarinis režimas būna, kai $Re < 50$).

Nepriklausomai nuo režimo λ galima apskaičiuoti pagal apibendrintą lygtį:

$$\lambda = 133/Re + 2{,}34 . \quad (6.71)$$

Esant mažoms *Re* vertėms, antrasis lygties dešiniosios pusės dėmuo gali būti neskaičiuojamas (prilyginamas nuliui). Kai $Re > 700$, prasideda automodelinis turbulentinis tekėjimas. Tada trinties koeficientas nepriklauso nuo *Re* ir tampa pastovus – $\lambda = 2{,}34$.

Skysčiui judant per smulkių dalelių sluoksnį (tai atitinka mažų *Re* verčių sritį), į (6.68) lygtį įrašę $\lambda = 133/Re$, o *Re* apskaičiavę pagal (6.70) lygtį, gausime naują lygtį grūdinio sluoksnio hidrauliniam pasipriešinimui apskaičiuoti:

$$\Delta p = 150 \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot H \cdot w_0 / (\Phi^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot d^2). \quad (6.72)$$

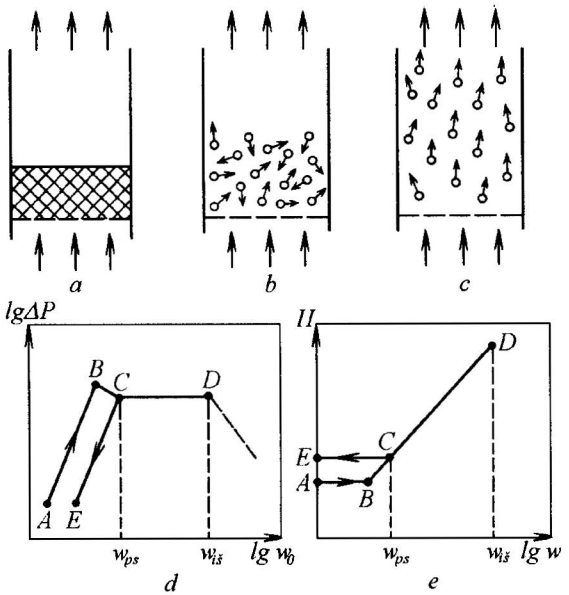
Ši lygtis vadinama Kozeni ir Karmano lygtimi.

Nagrinėjant skysčių ir dujų srauto tekėjimą per nejudamus grūdinės medžiagos arba įkrovos sluoksnius aparatuose, pripildytuose nejudamos grūdinės medžiagos arba įkrovos, apskaičiuojami slėgio arba slėgio aukščio nuostoliai dėl šių sluoksnių hidraulinių pasipriešinimų ir nustatomos optimalios proceso sąlygos.

6.9.2. Pseudoverdančiojo sluoksnio hidrodinamika

Nustatyta, kad grūdinio sluoksnio perėjimas į pseudoverdančiąją būseną leidžia intensyvinti daugelį cheminės technologijos procesų (pvz., adsorbciją, džiovinimą, šilumos mainus ir kt.), taip pat sudaro sąlygas maišyti birias medžiagas. Dalelės turi būti mažos, tada padidėja jų kontakto su skysčiu arba dujomis paviršius ir sumažėja sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas, todėl paspartėja šilumos ir masės mainų procesai. Šilumos ir masės mainų procesų greitis padidėja dar ir dėl to, kad pseudoverdančiojo sluoksnio sąlygomis visas dalelių paviršius yra apiplaunamas srauto, esant gana dideliam abiejų fazių

srautų greičiui. Priklausomai nuo skysčio arba dujų greičio galimos trys pagrindinės grūdinės medžiagos sluoksnio būsenos (6.16 pav.).



6.15 pav. Srauto judėjimo per kietų dalelių sluoksnį schemos ir srauto greičio įtaka sluoksnio hidrauliniam pasipriešinimui:
a – nejudamasis sluoksnis, *b* – pseudoverdantysis sluoksnis, *c* – sluoksnio dalelės juda su dujų (skysčio) srautu, *d* – sluoksnio hidraulinio pasipriešinimo, *e* – jo aukščio *H* priklausomybė nuo fiktyviojo srauto greičio

Nejudamos būsenos grūdinės medžiagos sluoksnis būna tada, kai srauto greitis *w* mažesnis už jo kritinį sluoksnio perėjimo į pseudoverdančiąją būseną greitį w_{ps} (6.15 pav., *a*). Tokio sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas didėja didėjant greičiui (6.15 pav., *d*, linija *ABC*), o poringumas ir sluoksnio aukštis lieka pastovūs (6.15 pav., *e*, linija *ABC*). Srauto judėjimo dėsningumai šiuo atvejui buvo nagrinėjami 6.9.1 skyriuje. Pasiekus tam tikrą kritinį greitį w_{ps}, atitinkantį tašką *C* (6.15 pav., *d* ir *e*), hidraulinis sluoksnio pasipriešinimas tampa lygus jo sunkio jėgai G_k visame aparato skerspjūvyje *F*, t. y.

$$\Delta p = G_k / F .$$

Dydį G_k galima išreikšti taip:

$$G_k = F \cdot H \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_k - \rho) \cdot g .$$

Tada $\Delta p = H \cdot (\rho_k - \rho) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g$. (6.72a)

Pasiekus kritinį greitį w_{ps}, sluoksnis tampa takus, jo dalelės sraute intensyviai juda įvairiomis kryptimis (6.15 pav., *b*). Sluoksnyje atsiranda dujų burbuliukų „peršokimų", o jo laisvame paviršiuje –„bangų" ir „fontanėlių", todėl sluoksnio poringumas ir aukštis didėja (6.15 pav., *e*). Tokios būsenos sluoksnis primena verdantį skystį, todėl jis buvo pavadintas pseudoverdančiuoju. Sluoksnis turi dar gana ryškią viršutinę ribą, skiriančią jį nuo perėjusio srauto. Linija *BC* (6.15 pav., *d* ir *e*) atspindi dalelių sankabos jėgų įtaką.

Toliau didėjant srauto greičiui iki vertės $w_{iš}$, esant pastoviam hidrauliniam pasipriešinimui, dalelės juda ir maišosi intensyviau; sluoksnio poringumas ir aukštis didėja (linija *CD*, 6.15 pav., *d* ir *e*). Srauto greičiui viršijus $w_{iš}$, pseudoverdantysis sluoksnis suyra ir srautas pradeda nešti sluoksnio daleles (6.16 pav., *c*). Dalelių masinio išnešimo reiškinys vadinamas hidrauliniu arba pneumatiniu transportu ir naudojamas pramonėje birioms medžiagoms transportuoti. Greitis $w_{iš}$ vadinamas išnešimo arba dalelių laisvo sklandymo greičiu. Pastarasis pavadinimas atsirado dėl to, kad, kai $w = w_{iš}$, sluoksnio poringumas tampa toks didelis ($\varepsilon \approx 1$), jog dalelės juda nepriklausomai vienos nuo kitų, laisvai sklando nenusėsdamos ir srautas jų neišneša (taškas *D*, 6.16 pav., *d* ir *e*), t. y. dalelių sunkio jėga tampa lygi pasipriešinimo jėgai, kuri atsiranda srautui aptekant daleles. Todėl greitis $w_{iš}$ gali būti nustatomas taip pat ir kaip nusodinimo greitis, t. y. apskaičiuojamas pagal (6.57) arba (6.59a) lygtis.

Mažinant srauto greitį, vyksta atvirkščias procesas. Po pseudoverdančiojo sluoksnio hidraulinio pasipriešinimo priklausomybę nuo greičio (6.16 pav., *d*) vaizduoja linija *CE*, o ne *BA*. Linijų sudaryta histerezės kilpa aiškinama tuo, kad po pseudoverdantysis sluoksnis tampa poringesnis, nei buvo prieš pseudovirimą. Tai reiškia, kad nejudančio sluoksnio hidraulinis pasipriešinimas po pseudovirimo tampa mažesnis, negu buvo prieš perėjimą į pseudovirimą. Jeigu po to vėl prasideda pseudovirimas, tai histerezės kilpa nesusidaro.

Taigi sluoksnio pseudoverdančiajai būsenai palaikyti darbinis srauto greitis w turi būti intervale $w_{ps} < w < w_i$. Darbinio ir pseudovirimo pradžios greičių santykis vadinamas pseudovirimo koeficientu K_{ps}:

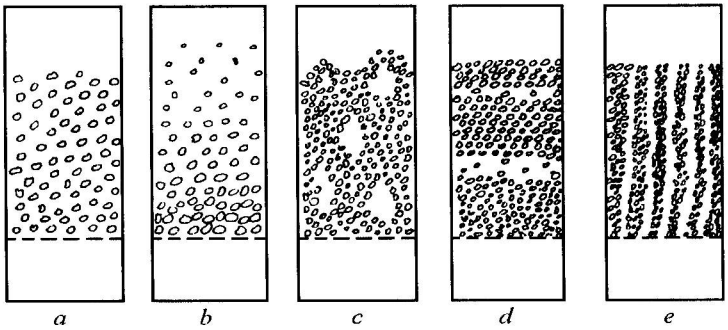
$$K_{ps} = w / w_{ps} . \qquad (6.73)$$

Pseudovirimo koeficientas apibūdina dalelių maišymosi intensyvumą. Kiekvienam konkrečiam procesui nustatoma optimali K_p vertė, intensyvus dalelių maišymasis pasiekiamas tada, kai $K_p = 2$.

Reikia pabrėžti, kad pseudoverdančiojo sluoksnio struktūra priklauso nuo to, koks srautas (skysčio ar dujų) gūdinio sluoksnio daleles pakėlė į pseudoverdančiąją būseną.

Tolyginis pseudoverdantysis sluoksnis gaunamas lašelinių skysčių srautui pakeliant daleles į pseudoverdančiąją būseną (6.17 pav., *a*). Šiuo atveju

srauto greičiui viršijus w_{ps}, susidaro sąlygos sluoksnio aukščiui tolygiai didėti be didesnių sluoksnio viršutinės ribos svyravimų.



6.16 pav. Srautų skverbimosi pro grūdinės įkrovos pseudoverdantįjį sluoksnį: *a* – tolygusis skysčio judėjimas, *b* – tolygusis dujų judėjimas, *c* – dujų burbulų judėjimas, *d* – stūmoklinis dujų judėjimas, *e* – judėjimas atvirais pseudoverdančiojo sluoksnio kanalais

Realių procesų metu pseudoverdantysis grūdinės medžiagos sluoksnis dažniau yra sudaromas dujų srauto. Paprastai gaunamas netolygus pseudoverdantysis sluoksnis, kuriam būdingi dideli pseudovirimo skaičiai (6.16 pav., *b*). Tačiau dalis dujų juda ne tik tankia mase, bet ir gana dideliais burbulais (6.16 pav., *c*). Šie burbulai ištekėdami iš sluoksnio suyra, dėl to sluoksnio aukštis smarkiai svyruoja. Didėjant dujų greičiui ir K_p, sluoksnio netolygumas ir burbulų dydis didėja (kai kada jis gali prilygti aparato skersmeniui), tuomet prasideda virš burbulų esančių sluoksnio dalelių stūmoklinis judėjimas (6.16 pav., *d*). Burbulams ištekant iš pseudoverdančiojo sluoksnio, dalis sluoksnio pamėtėjama į viršų, todėl dalelės yra išnešamos dujų srauto. Toks pseudovirimas kartais vadinamas stūmokliniu. Dėl stūmoklinio pseudovirimo pablogėja kontaktas tarp dalelių ir dujų, todėl pablogėja proceso sąlygos. Jeigu į pseudoverdančiąją būseną pakeliamos smulkios sulimpančios medžiagos dalelės, tai, kai srauto greičiai nedaug didesni už w_{ps}, susidaro per visą sluoksnį einantys atviri kanalai (6.16 pav., *e*), dėl kurių gali būti pažeistas sluoksnio tolygumas. Šiuo atveju daug dujų prateka tokiais kanalais, t. y. dujų srautas peršoka arba aplenkia nepaliesdamas viso sluoksnio dalelių. Didėjant dujų greičiui, šie kanalai dažnai visai išnyksta arba išlieka tik sluoksnyje, esančiame tiesiai virš atraminio paskirstymo tinklelio.

Aparato su pseudoverdančiuoju grūdinės medžiagos sluoksniu darbas priklauso nuo atraminio paskirstymo tinklelio konstrukcijos. Tinklelis turi ne tik sulaikyti grūdinės medžiagos daleles aparato darbo pradžioje ir pabaigus darbą, bet ir tolygiai paskirstyti skysčio arba dujų srautus visame aparato skerspjūvyje.

Dalelių perėjimo į pseudoverdantįjį sluoksnį greitis w_{ps} patikimiausiai nustatomas eksperimentiškai, naudojant laboratorinius arba pusiau gamybinius stendus.

w_{ps} apskaičiuojamas taip. Rutulio arba jam artimos formos dalelių kritinę Reinoldso kriterijaus vertę ($Re_{0,ps}$), kurią pasiekus prasideda pseudovirimas, galima apskaičiuoti pagal lygtį

$$Re_{0,ps} = Ar/\left(1400 + 5{,}22 \cdot \sqrt{Ar}\right). \qquad (6.74)$$

Archimedo kriterijaus išraiškoje $Ar = \left(d^3 \cdot \rho^2 g/\mu^2\right) \cdot [(\rho_k - \rho)/\rho]$ visi dydžiai yra žinomi. Tada pagal (6.74) lygtį apskaičiavus $Re_{0,ps} = w_{ps} \cdot d \cdot \rho/\mu$, nustatomas ieškomasis greitis w_{ps}. Žinant jį, galima apskaičiuoti darbinį srauto greitį w (pagal žinomą K_{ps} vertę), o pagal jį – aparato skersmenį ((6.39) lygtis) ir hidraulinį grūdinio sluoksnio pasipriešinimą.

Dalelių išnešimo greitis $w_{iš}$, kurį pasiekus suardomas pseudoverdantysis sluoksnis ir pradedamos masiškai nešti dalelės, apskaičiuojamas taip pat kaip ir nusodinimo greitis (pagal (6.59a) lygtį apskaičiavus Reinoldso kriterijaus vertę $Re_{0,iš} = w_{iš} \cdot d \cdot \rho/\mu$, apskaičiuojamas išnešimo greitis $w_{iš}$).

Didėjant srauto greičiui pseudoverdančiajame sluoksnyje, didėja sluoksnio aukštis H ir poringumas ε. Poringumą galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$\varepsilon = \left(18 \cdot Re + 0{,}36 \cdot Re^2/Ar\right)^{0{,}21}. \qquad (6.75)$$

Ją rekomenduojama naudoti tik esant tolyginiams pseudoverdantiesiems sluoksniams.

Nejudamo sluoksnio tūrį, aukštį ir poringumo koeficientą atitinkamai pažymime V_0, H_0 ir ε_0, o tuos pačius pseudoverdančiojo sluoksnio dydžius – V, H ir ε. Kadangi kietosios fazės tūris V_k pastovus, tai

$$V_k = V_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) = V \cdot (1 - \varepsilon).$$

Tada $V/V_0 = (1 - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon)$.

Pastovaus skerspjūvio aparate

$$V/V_0 = H/H_0 = (1 - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon).$$

Pagal (6.75) lygtį apskaičiavus ε vertę, galima apskaičiuoti pseudoverdančiojo sluoksnio aukštį:

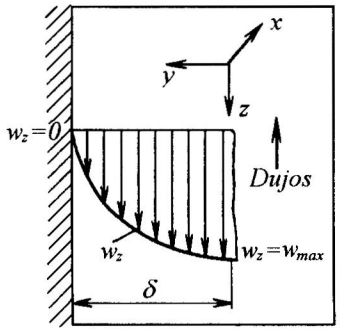
$$H = H_0 \cdot (1 - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon). \qquad (6.76)$$

Šis aukštis reikalingas aparatų su grūdinės medžiagos sluoksniu aukščiui apskaičiuoti.

6.10. Plėvelinis skysčio judėjimas

Daug šilumos ir masės mainų procesų vyksta aparatuose, kuriuose viena iš fazių plona skysčio plėvele teka kieta, dažniausiai vertikalia, sienele. Šių procesų greitis daug priklauso nuo srauto greičio pasiskirstymo pagal plėvelės storį ir pačios plėvelės storio.

Nagrinėsime skysčio plėvelės tekėjimą nuo vertikalaus paviršiaus, veikiant sunkio jėgai, kai kita procese dalyvaujanti fazė (dujos, garai arba skystis) nedaro didesnės įtakos šios plėvelės judėjimui.



6.17 pav. Greičio pasiskirstymas pagal žemyn tekančios skysčio plėvelės storį

Greičio pasiskirstymas pagal besileidžiančio skysčio plėvelės storį. Tariame, kad skystis plona plėvele leidžiasi vertikaliu paviršiumi žemyn, esant laminariniam nuostoviajam srauto judėjimui (technikoje plačiai paplitęs procesas). Šį procesą pavaizduosime stačiakampėje koordinačių sistemoje. Ordinatė (6.17 pav.) nukreipta greičio mažėjimo kryptimi (t. y. statmenai sienelei, pagal plėvelės storį). *z* ašis nukreipta plėvelės tekėjimo kryptimi, o *x* ašis išilgai plėvelės paviršiaus (pagal jos plotį). Esant laminariniam judėjimui, skysčio dalelės juda tik *z* ašies kryptimi (t. y. pagal plėvelės aukštį). Skysčio dalelės išilgai *x* ir *y* ašių (t. y. pagal plėvelės plotį ir storį) nejuda. Esant tokiai prielaidai, greičio dedamosios $w_x = 0$ ir $w_y = 0$, bet $w_z \neq 0$.

Greičių pasiskirstymą besileidžiančioje plėvelėje galima nustatyti, išsprendus vienmačio nuostoviojo srauto Navjė ir Stokso lygtį kartu su vientisojo srauto lygtimi. Vienmačio nuostoviojo srauto Navjė ir Stokso lygtis (išilgai *z* ašies) užrašoma taip:

$$\rho \cdot \left(w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) = \\ = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \cdot g + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right). \quad (6.77)$$

Kadangi z ašies kryptis sutampa su plėvelės judėjimo kryptimi, tai prieš pirmąjį ir antrąjį (6.77) lygties dešiniosios pusės narį rašomas pliuso ženklas (įprastinėje Navjė ir Stokso lygtyje, kai srautas teka kanalais, prieš šiuos narius rašomas minuso ženklas). Nagrinėjamo judėjimo debito pastovumo lygtis tokia:

$$\partial w_x / \partial x + \partial w_y / \partial y + \partial w_z / \partial z = 0 . \quad (6.78)$$

Kadangi $w_x = w_y = 0$, tai $\partial w_x / \partial x = \partial w_y / \partial y = 0$. Tada iš (6.78) lygties $\partial w_z / \partial z = 0$, o kairioji (6.77) lygties pusė užrašoma taip:

$$\rho \cdot \left(w_x \cdot \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) = 0 .$$

Kadangi nuo dujų pusės plėvelės trinties jėga yra maža ir jos dažniausiai nepaisoma, o dujos, kurios gali pakeisti slėgį plėvelėje, yra mažo tankio ir beveik nekeičia slėgio pagal plėvelės aukštį, tai $\partial p / \partial z = 0$. Kadangi $\partial^2 w_z / \partial x^2 = \partial^2 w_z / \partial z^2 = 0$, o $\partial^2 w_z / \partial y^2 \neq 0$, tai (6.77) lygtį galima užrašyti taip:

$$0 = \rho \cdot g + \mu \cdot \partial^2 w_z / \partial y^2 \quad \text{arba} \quad \rho \cdot g = -\mu \cdot \partial^2 w_z / \partial y^2 . \quad (6.79)$$

(6.79) lygtyje dalinė išvestinė apibūdina visą greičio pasikeitimą, todėl ją galima pakeisti pilnuoju diferencialu.

Integruojame (6.79) lygtį: kai $y = \delta$, tada $w_z = 0$, o kai $y = 0$, tai $\partial w_z / \partial y = 0$ (kadangi trinties jėga neveikia laisvo plėvelės paviršiaus, tai jos greitis pastovus).

(6.79) lygtį užrašome taip:

$$\rho \cdot g = -\mu \cdot \frac{d^2 w_z}{dy^2} = -\mu \cdot \frac{d(dw_z / dy)}{dy} .$$

Izoterminiame sraute tekančio agento ρ ir μ yra pastovūs. Tada:

$$\frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot \int_0^y dy = -\int_0^{dw/dy} d\left(\frac{dw_z}{dy}\right); \quad \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot y = -\frac{dw_z}{dy}. \tag{6.80}$$

Integruodami (6.80) lygtį intervaluose nuo y iki δ (t. y. pagal plėvelės storį) ir nuo w_z iki 0 (pagal vidutinį srauto greitį skerspjūvyje), gausime:

$$\frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot \int_y^{\delta} y \cdot dy = -\int_{w_z}^{0} dw_z = \int_0^{w_z} dw_z.$$

Iš šios lygties:

$$\frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot \left(\frac{\delta^2 - y^2}{2}\right) = w_z \quad \text{arba} \quad w_z = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2}{2 \cdot \mu} \cdot \left(1 - \frac{y^2}{\delta^2}\right). \tag{6.81}$$

Kadangi (6.81) lygtis yra parabolės lygtis, tai reiškia, kad greitis plėvelės skerspjūvyje kinta pagal parabolę. Maksimali greičio vertė yra prie laisvo plėvelės paviršiaus, t. y. kai $y = 0$, tai $w_z = w_{maks\ pl}$, o kai $y = \delta$, tai $w_z = 0$ (prie sienelės). Tada:

$$w_{maks.\ pl} = \rho \cdot g \cdot \delta^2 / (2 \cdot \mu), \tag{6.82}$$

$$w_z = w_{maks.\ pl} \cdot (1 - y^2 / \delta^2); \tag{6.83}$$

čia y – momentinė ordinatės vertė.

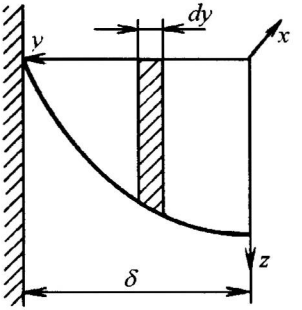
(6.83) lygtis yra analogiška Stokso dėsnio lygčiai, kai skystis teka skritulio formos skerspjūvio kanalais ((6.18) lygtis). Reikia pasakyti, kad visi greičio pokyčiai, apskaičiuoti pagal (6.83) lygtį, vyksta labai mažame vertikalia sienele žemyn tekančios skysčio plėvelės storyje. δ paprastai būna 1 mm eilės arba mažesnis.

Vertikalia sienele žemyn plėvele tekančio skysčio debitas ir jo vidutinis tekėjimo greitis. Skysčio plėvelėje (6.19 pav.) išskiriamas elementarus pjūvis, kurio storis *dy*.

Per šį skerspjūvį prateka skysčio tūris dV:

$$dV = w_z \cdot dF = w_z \cdot \Pi \cdot dy; \tag{6.84}$$

čia dF – plėvelės skerspjūvio plotas, m^2; Π – plėvelės drėkinamas perimetras (jei paviršius plokščias, – plotis).



6.18 pav. Vertikalia sienele žemyn besileidžiančios plėvelės debito ir vidutinio greičio skaičiavimo elementai

Į (6.84) lygtį įrašę w_z, apskaičiuotą pagal (6.83) lygtį, gausime:

$$dV = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2}{2 \cdot \mu} \cdot \left(1 - \frac{y^2}{\delta^2}\right) \cdot \Pi \cdot dy . \qquad (6.85)$$

(6.85) lygties kairiąją pusę integruojame nuo *0* iki *V*, dešiniąją – nuo *0* iki δ:

$$\int_0^V dV = \frac{\rho \cdot g}{2 \cdot \nu} \cdot \Pi \cdot \int_0^{\delta} \left(\delta^2 - y^2\right) \cdot dy; \quad V = \frac{\rho \cdot g \cdot \Pi}{2 \cdot \mu} \cdot \left(\delta^2 \cdot \delta - \frac{\delta^3}{3}\right) = \frac{\rho \cdot g \cdot \Pi \cdot 2}{2 \cdot \mu \cdot 3} \cdot \delta^3 .$$

Pertvarkę gauname:

$$V = \rho \cdot g \cdot \Pi \cdot \delta^3 / (3 \cdot \mu). \qquad (6.86)$$

(6.86) lygtis naudojama plėvele besileidžiančio skysčio tūrio debitui apskaičiuoti.

V vertė taip pat gali būti apskaičiuojama pagal tokią debito lygtį:

$$V = w_{vid} \cdot \Pi \cdot \delta ; \qquad (6.87)$$

čia w_{vid} –žemyn tekančio skysčio plėvelės vidutinis greitis.

Pertvarkę (6.87) ir (6.86) lygtis w_{vid} atžvilgiu, gauname:

$$w_{vid} = V/(\Pi \cdot \delta) = \rho \cdot g \cdot \Pi \cdot \delta^3 / (3 \cdot \mu \cdot \Pi \cdot \delta) = \rho \cdot g \cdot \delta^2 / (3 \cdot \mu). \quad (6.88)$$

Padaliję (6.82) lygtį iš (6.88) lygties, gauname: $w_{maks,\,pl} / w_{vid} = 3/2$, t. y. $w_{maks,\,pl} = 1{,}5 \cdot w_{vid}$ (skysčiui tekant kanalais laminariniu režimu, $w_{maks} = 2 \cdot w_{vid}$).

Pagal (6.86) ir (6.88) lygtis apskaičiuojant V arba w_{vid}, reikia žinoti plėvelės storį δ. Todėl raide Γ pažymėkime drėkinimo tankį masės vienetais $[kg/(m \cdot s)]$. Drėkinimo tankis yra per sekundę skysčio plėvelės perimetro ilgio vienetu pratekėjusio skysčio masė. Tada:

$$\Gamma = V \cdot \rho / \Pi . \tag{6.89}$$

Įvertinus (6.87) lygtį,

$$\Gamma = w_{vid} \cdot \Pi \cdot \delta \cdot \rho / \Pi = w_{vid} \cdot \delta \cdot \rho . \tag{6.89a}$$

Iš čia

$$w_{vid} = \Gamma / (\delta \cdot \rho). \tag{6.90}$$

Palyginę (6.88) ir (6.90) lygtis, gauname:

$$\Gamma / (\delta \cdot \rho) = \rho \cdot g \cdot \delta^2 / (3 \cdot \mu).$$

Iš čia

$$\delta = \sqrt[3]{3 \cdot \mu \cdot \Gamma / (g \cdot \rho^2)}. \tag{6.91}$$

Vidutinis srauto greitis taip pat gali būti išreiškiamas drėkinimo tankiu. Tam tikslui (6.90) lygtis pertvarkoma taip:

$$w_{vid} = \frac{\Gamma}{\delta \cdot \rho} = \frac{\Gamma}{\sqrt[3]{3 \cdot \mu \cdot \Gamma / (g \cdot \rho^2)} \cdot \rho} = \sqrt[3]{\frac{\Gamma^2 \cdot g}{3 \cdot \mu \cdot \rho}} . \tag{6.92}$$

(6.92) lygtį, į kurios dešiniąją pusę įeina visi žinomi arba lengvai nustatomi dydžiai, kartu su (6.87) lygtimi galima naudoti ir skysčio tūrio debitui apskaičiuoti.

Šiame skyriuje išnagrinėtos pagrindinės skysčio plėvelės laminarinio tekėjimo charakteristikos, kai plėvelės paviršiuje nesusidaro bangos.

Hidrodinaminis skysčio plėvelės tekėjimo režimas apibūdinamas Reinoldso kriterijumi Re_{pl}, kuriam apskaičiuoti naudojamas vidutinis skysčio judėjimo greitis w_{vid} ir ekvivalentinis plėvelės skersmuo d_{ekv}:

$$Re_{pl} = \frac{w_{vid} \cdot \rho \cdot d_{ekv}}{\mu};$$

čia $d_{ekv} = 4 \cdot F / \Pi = 4 \cdot \Pi \cdot \delta / \Pi = 4 \cdot \delta$.

Tada $Re_{pl} = w_{vid} \cdot 4 \cdot \delta \cdot \rho / \mu$. (6.93)

Atsižvelgiant į Re_{pl} vertę eksperimentiškai yra nustatyti trys pagrindiniai skysčio plėvelės judėjimo hidrodinaminiai režimai: laminarinis ($Re_{pl} < 30$), kai plėvelės fazes skiriantis paviršius yra glotnus (be bangų); laminarinis ($30 < Re_{pl} < 1600$), kai plėvelės fazes skiriantis paviršius yra banguotas; turbulentinis ($Re_{pl} > 1600$). Re_{pl} vertės, atitinkančios perėjimą nuo vieno režimo prie kito, nurodytos orientacinės.

Kadangi sunku nustatyti plėvelės storį ir vidutinį tekėjimo greitį, kai tekėjimas yra turbulentinis arba laminarinis, o fazes skiriantis paviršius yra banguotas, tai Re_{pl}, esant šiems režimams, apskaičiuojamas naudojant drėkinimo tankį Γ((6.89a) lygtis):

$$Re_{pl} = 4 \cdot w_{vid} \cdot \delta \cdot \rho / \mu = 4 \cdot \Gamma / \mu . \qquad (6.94)$$

Visais atvejais nebuvo atsižvelgta į dujų (garų arba skysčio) judėjimo išilgai plėvelės įtaką. Tačiau tam tikromis sąlygomis (esant pakankamai dideliems dujų greičiams) dujų srauto įtaka plėvelės tekėjimui gali būti gana didelė. Pvz., tekant skysčio plėvelei vamzdžių vidiniu paviršiumi, dujos dideliu greičiu (5...10 m/s) juda priešinga kryptimi. Šiuo atveju dėl trinties tarp dujų ir plėvelės paviršiaus fazių sąlyčio paviršiuje gerokai padidėja tangentiniai įtempiai. Plėvelė storėja (plėvelės judėjimas stabdomas), didėja hidraulinis pasipriešinimas dujų judėjimui. Toliau didinant dujų greitį, gali būti pasiekta pusiausvyra tarp žemyn tekančios plėvelės sunkio jėgos ir trinties jėgos, dėl kurios labai padidėjus plėvelės storiui skystis kaupiasi ir yra išmetamas dujų srauto. Tokiomis sąlygomis pažeidžiamas aparatų, kuriuose vykstantis procesas yra pagrįstas plėveliniu fazių kontaktu, darbas. Toks reiškinys technikoje vadinamas užspringimu. Priešsroviniuose aparatuose (ne tik plėveliniuose) dujų arba garų greitis, kuriam esant aparatas užspringsta, yra viršutinė greičio riba. Šį greitį kiekvienam konkrečiam aparatui arba procesui galima apskaičiuoti (žr. masės mainų aparatus).

6.11. Barbotažo hidrodinamika

Vienas iš dažniausiai pramonėje taikomų fazių paviršių sąlyčio didinimo būdų yra barbotažas. Paprastai barbotažo metu dujos arba garai pro paskirstymo elemento skylutes pernešami į skystį ir disperguojami jame smulkiais burbuliukais. Toks procesas vadinamas masiniu barbotažu.

Ribiniu atveju dujos į skystį gali patekti pro vieną skylutę. Tada, esant nedideliems debitams, dujos barbotuoja per skystį atskirų laisvai išplaukiančių burbulų pavidalu. Toks barbotažo režimas vadinamas laisvu burbulų išplaukimu. Pradžioje burbuliuko skersmuo didėja, o vėliau, kai keliamoji, arba Archimedo, jėga susilygina su pasipriešinimo atitrūkimui jėga, burbuliukas atitrūksta nuo angos. Rutulio formos burbuliuko, kurio skersmuo d_b, keliamoji jėga P_k apskaičiuojama taip:

$$P_k = (\pi \cdot d_b^3 \cdot g/6) \cdot (\rho_{sk} - \rho_d);$$

čia ρ_{sk} ir ρ_d – atitinkamai skysčio ir dujų tankis, kg/m^3.

Pasipriešinimo atitrūkimui jėga R_0 priklauso nuo angos skersmens d_0 ir skysčio paviršiaus įtempio σ: $R_0 = \pi \cdot d_0 \cdot \sigma$.

Tada, kai $P_k = R_0$, gauname:

$$(\pi \cdot d_b^3 \cdot g/6) \cdot (\rho_{sk} - \rho_d) = \pi \cdot d_0 \cdot \sigma.$$

Iš čia burbuliuko skersmuo

$$d_b = \sqrt[3]{6 \cdot d_0 \cdot \sigma / [g \cdot (\rho_{sk} - \rho_d)]}. \qquad (6.95)$$

(6.95) lygtis galioja, kai burbuliukų susidarymo greitis nedidelis. Ji rodo, kad laisvo judėjimo režimu burbuliuko skersmuo priklauso nuo skysčio fizikinių savybių ir angos skersmens, bet nepriklauso nuo dujų debito V_{s0}. Nuo angos per sekundę atitrūkstančių burbuliukų skaičius n yra vadinamas atitrūkimo dažniu, s^{-1}):

$$n = 6 \cdot V_{s0} / (\pi \cdot d_b^3). \qquad (6.96)$$

Didėjant dujų debitui, jis didėja tol, kol pasiekiamas kritinis dujų debitas:

$$V_{s0\,kr} = \frac{\pi \cdot d_b^3 \cdot w_k}{6} = \frac{\pi \cdot w_k}{6} \cdot \left[\frac{6 \cdot d_0 \cdot \sigma}{g \cdot (\rho_{sk} - \rho_d)} \right]^{2/3}; \qquad (6.97)$$

čia w_k – burbuliukų kilimo greitis, m/s.

Kai dujų sąnaudos viršija kritines V_{s0kr}, nuosekliai vienas po kito nuo angos atitrūkstantys burbuliukai liečiasi vienas su kitu ir kyla grandinėlės pavidalu, vyksta grandininis judėjimas. Didėjant dujų sąnaudoms, kartu didėja burbuliukų skersmuo:

$$d_b = \sqrt{6 \cdot V_{s0} / (\pi \cdot w_k)}.$$

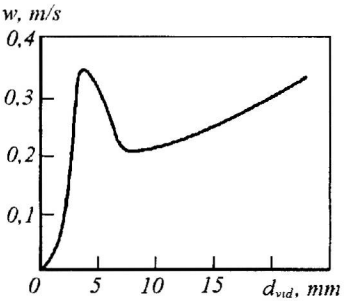
Esant nuostoviajam judėjimui, burbuliukų kilimo greitis nustatomas iš burbuliukų kėlimo ir terpės pasipriešinimo jėgų lygybės. Esant laminariniam burbuliukų judėjimui, tai užrašoma žinomu Stokso dėsniu ((6.58) lygtis):

$$w_k = d_k^2 \cdot g \cdot (\rho_{sk} - \rho_d) / (18 \cdot \mu). \qquad (6.98)$$

Kai sąlygos vienodos, dujų burbuliuko kilimo greitis 1,5 karto didesnis už to paties skersmens kietos medžiagos rutuliuko nusėdimo greitį, todėl,

skaičiuojant kietos medžiagos rutuliuko nusėdimo greitį, (6.98) lygties vardiklyje vietoj 18 rašoma 12. Tai aiškinama tuo, kad skysčio ir dujų kontakto paviršiuje vyksta santykinis fazių judėjimas. Skysčio ir kietos dalelės sistemoje prie dalelės paviršiaus yra nejudamas skysčio sluoksnis (žr. 6.8 skyrių), dėl kurio prie šio paviršiaus atsiranda didelis greičio gradientas, o tai reiškia, kad nagrinėjamų kietų dalelių judėjimo atveju klampa daro didesnę įtaką, negu dujų burbuliukui kylant.

Didėjant burbuliukų dydžiui, jų judėjimo dėsningumas skiriasi nuo anksčiau išnagrinėtų. Tai paaiškinama skysčio paviršiaus įtempio įtakos burbuliukų formai sumažėjimu. Šiuo atveju burbuliukai praranda rutuliuko formą ir susilieja. Tokių burbuliukų judėjimo trajektorija nukrypsta nuo vertikalės; jų kilimo greitis, didėjant skersmeniui, didėja nežymiai. 6.19 pav. ant abscisės ašies atidėtas vidutinis burbuliuko skersmuo, apskaičiuotas kaip skersmuo taisyklingo rutulio, kurio tūris lygus burbuliuko tūriui. Tokį skersmenį įprasta vadinti ekvivalentiniu.



6.19 pav. Dujų burbuliuko kilimo greičio priklausomybė nuo jo skersmens

Masiniam barbotažui laisvo burbuliukų išplaukimo režimu aprašyti tinka dėsningumai, išnagrinėti vienam burbuliukui. Kai dujų greičiai didesni už kritinį, šie dėsningumai negalioja. Tokia dujų ir skysčio sistema, dažnai vadinama putomis, apibūdinama dujų kiekiu mišinyje ir kontakto paviršiumi.

Reikia pasakyti, kad barbotuojant atsiradusios putos yra nestabilios ir, nustojus tiekti dujas, tuoj pat suyra.

Putų sluoksnio tankį ρ_p galima apskaičiuoti taip:

$$\rho_p = \varepsilon \cdot \rho_d + (1-\varepsilon)\cdot \rho_{sk} \approx (1-\varepsilon)\cdot \rho_{sk}\,; \qquad (6.99)$$

iš čia $\varepsilon = 1 - \rho_p / \rho_{sk}$. ε – dujų tūrio dalis putose.

Iš hidrostatinio slėgio lygybės

$$h_p \cdot \rho_p \cdot g = h_0 \cdot \rho_{sk} \cdot g$$

išplaukia, kad $\rho_p / \rho_{sk} = h_0 / h_p$;

čia h_p ir h_0 – putų ir nuskaidrėjusio skysčio sluoksnio aukščiai. h_p ir h_0 vertės nustatomos eksperimentiškai.

Taigi

$$\varepsilon = 1 - \rho_p / \rho_{sk} = 1 - h_0 / h_p . \qquad (6.100)$$

Savitasis burbuliukų paviršius a, m^2/m^3, parodo fazių kontakto paviršių putų tūrio vienete:

$$a = n \cdot \pi \cdot d_{vid}^2 / V_p ;$$

čia n – burbuliukų skaičius; d_{vid} – burbuliukų ekvivalentinis skersmuo; V_p – putų tūris.

Dujų kiekis gali būti išreikštas lygtimi: $\varepsilon = n \cdot \pi \cdot d_{vid}^2 / (6 \cdot V_p)$. Tada

$$V_p = n \cdot \pi \cdot d_{vid}^2 / (6 \cdot \varepsilon) = n \cdot \pi \cdot d_{vid}^2 / a .$$

Iš čia

$$d_{vid} = 6 \cdot \varepsilon / a . \qquad (6.101)$$

Pagal (6.101) lygtį galima apskaičiuoti a, kai žinomas d_{vid}.

Pateiktos dujų ir skysčio sistemos hidrodinaminės charakteristikos turi didelę vertę skaičiuojant lėkštinius masės mainų aparatus. Hidrodinaminių režimų analizė, vykstant masiniam barbotažui, nagrinėjama masės mainų procesams skirtoje dalyje.

6.12. Skysčių dispergavimas

Technikoje skysčio ir dujų arba garų fazių sąlyčio paviršius dažniausiai didinamas dispergavimu – trupinimu, išpurškimu lašais. Šis metodas taip pat taikomas dviejų skysčių (sistemoje skystis–skystis) fazių sąlyčio paviršiams didinti. Dispersijos terpėje judančių lašų aptekėjimas skiriasi nuo kietų medžiagos dalelių aptekėjimo skysčiu, dujomis arba garais. Skirtumas atsiranda dėl tokių priežasčių: 1) terpėje judančių lašelių forma gali esmingai pasikeisti (rutulio formos lašas tampa sferoidu, toru ir t. t.). Šis keitimasis gali būti ciklinškas (šiuo atveju vyksta dalelės osciliacija (lot. *oscillo* – sūpuoju) – dalelės po tam tikro laiko atgauna formą) ir kryptingas (kol susidaro tam tikros formos lašeliai); 2) lašelio viduje gali susidaryti cirkuliuojantys skysčio srautai;

šios cirkuliacijos intensyvumas ir pobūdis, judant lašeliams, gali keistis; 3) lašeliai gali suirti ir susidaryti mažesni lašeliai; 4) masiškai judėdami lašeliai gali susidurti tarpusavyje, atšokti arba susilieti į vieną, o po to smulkėti.

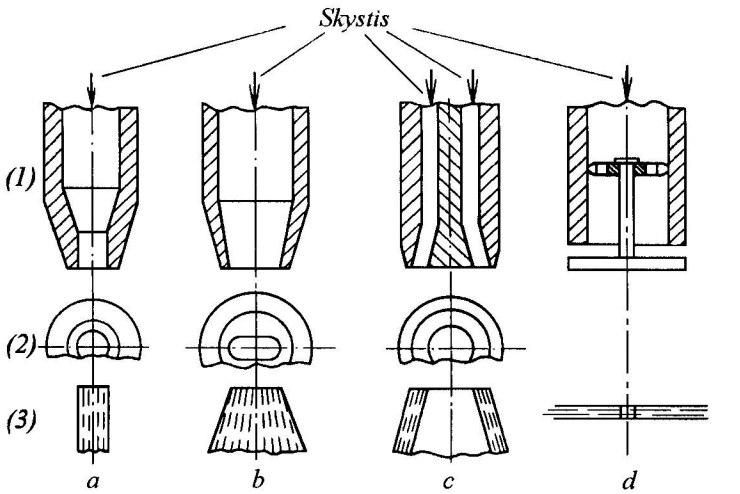
6.12.1. Skysčių dispergavimo metodai

Pagal naudojamos energijos tiekimo būdą dispergavimas skirstomas į hidraulinį, mechaninį ir pneumatinį.

Hidraulinis dispergavimas. Taikant šį metodą, skystis virsta lašais veikiamas slėgio. Tekėdamas per dispergavimo elementą (purkštukus ir kt.), dėl slėgio skystis įgauna didelį greitį ir tokią formą (čiurkšlės, plėvelės ir t. t.), kad gali greitai ir efektyviai suirti.

Hidraulinio dispergavimo purkštukai pagal veikimo principą skirstomi į čiurkšlinius ir išcentrinius.

Čiurkšlinius purkštukus sudaro cilindro arba kitokios formos antgaliai. Dėl slėgių skirtumo iš purkštuko ištekanti čiurkšlė virsta įvairaus skersmens lašais. 6.20 pav. pavaizduotos kelios dažniausiai naudojamų čiurkšlinių purkštukų schemos.



6.20 pav. Čiurkšlinių purkštukų antgalių (*1*), kanalų (*2*) ir susidarančių čiurkšlių (*3*) formos:
a – cilindrinis antgalis, *b* – plyšio formos antgalis, *c* – žiedinis antgalis, *d* – antgalis su apskritimo formos įpjova

Susiduriančių čiurkšlių purkštukai veikia pagal kelių ištekančių čiurkšlių susmulkinimo į lašelius principą. Iš dviejų cilindrinių čiurkšlių susidūrimo

taško suminis srautas pasiskirsto įvairiomis kryptimis, sudarydamas plokščią plėvelę, kuri toliau virsta lašais.

Išcentriniai purkštukai paprastai turi liestinės arba tangentine kryptimi išsidėsčiusias angas, kurios sudaro sąlygas ištekančias čiurkšles intensyviau versti lašeliais.

Hidraulinis dispergavimas yra paprastas ir dėl mažų energijos sąnaudų gana ekonomiškas (2...4 kW tonai skysčio disperguoti), todėl plačiai taikomas technikoje.

Prie hidraulinio dispergavimo trūkumų reikia priskirti gana stambų ir netolygų skysčio smulkinimą, be to, šiuo būdu sunku disperguoti klampius skysčius.

Hidraulinio dispergavimo efektyvumą galima padidinti impulsais keičiant disperguojamo skysčio srauto debitą arba slėgį, taip pat abu kartu. Pulsacinio dispergavimo metu atsirandantys papildomi skysčio čiurkšlės arba plėvelės parametrų svyravimai padeda padidinti paviršiaus energiją, srautą greitai destabilizuoja, todėl skystis disperguojamas smulkiau.

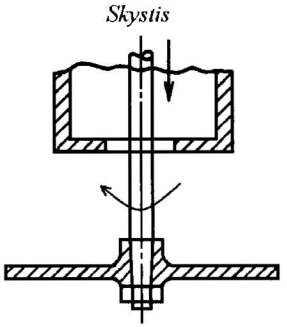
Hidraulinio dispergavimo efektyvumą galima padidinti elektrine iškrova periodiškai skaidant skysčio čiurkšlę išpurškimo ertmėje. Impulso metu susidaro didesniu greičiu išmetamų lašelių srautas. Šie lašeliai pasiveja ir dar labiau susmulkina lašelius, kurie iš dispergavimo elemento išlėkė per laiką tarp gretimų impulsų. Be to, iškrovą sukeliantys efektai (smūgio banga, kavitacija) tęsiasi beveik visą laiką tarp impulsų ir taip pat smulkina iš purkštuko ištekantį skystį.

Mechaninis dispergavimas. Šiuo metodu disperguojamas skystis energiją gauna dėl trinties į greitai besisukantį darbo elementą. Sukdamasis skystis, veikiamas išcentrinės jėgos, atitrūksta nuo darbo elemento plėvele arba čiurkšle ir virsta lašeliais.

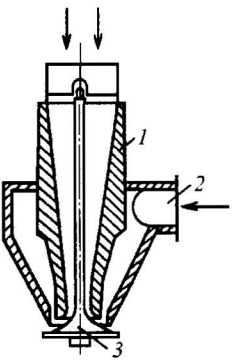
Pagal tai, kaip skystis patenka ant darbo elemento, mechaninio dispergavimo elementai skirstomi į tiesioginio skysčio tiekimo elementus ir panardinamuosius. Patekęs ant darbo elemento, skystis, veikiamas išcentrinės jėgos, nuteka juo ir yra ištaškomas. Paprasčiausias iš tokių elementų yra glotnus lėkštinis diskas (6.21 pav.); dispergavimo efektyvumui padidinti diskas sukamas.

Vienu iš pagrindinių mechaninio dispergavimo pranašumų laikoma galimybė disperguoti klampius ir užterštus skysčius. Trūkumas – sudėtinga ir brangi mechaninio dispergavimo darbo elementų gamyba ir eksploatacija (energijos sąnaudos vienai tonai skysčio disperguoti siekia 15 kW).

Pneumatinis dispergavimas. Disperguojant šiuo metodu, energija skysčiui perduodama dėl skysčio ir dujų srautų tarpusavio sąveikos. Dėl didelio srautų greičių skirtumo dispergavimo elemente skystis pradžioje susisluoksniuoja į atskiras čiurkšles, o šios vėliau suskyla į lašus.



6.21 pav. Lėkštinio purkštuvo schema



6.22 pav. Pneumatinio purkštuvo schema: *1* – suslėgto oro tiekimo atvamzdis, *2* – disperguojamo skysčio tiekimo atvamzdis, *3* – kreipiamasis diskas (lėkštė)

Pneumatinis dispergavimas pasirenkamas tada, kai reikia, kad skysčio lašeliai būtų labai smulkūs (100...200 μm skersmens), o kitais dispergavimo būdais tai pasiekti sunku. 6.22 pav. pavaizduota vienos iš daugelio konstrukcijų pneumatinio purkštuko schema. Disperguojamas skystis tiekiamas ant lėkštės *3*, o nuo jos suslėgtos dujos nupučia jį ir disperguoja.

Pneumatinio dispergavimo kokybė mažai priklauso nuo skysčio debito. Dispergavimo elemento eksploatacija yra patikima, galima disperguoti klampius skysčius. Trūkumas – didelės energijos sąnaudos (50...60 kW/t skysčio), be to, reikalingas suslėgtas dispergatorius (paprastai oras) ir aparatai jam suslėgti ir tiekti.

Pneumatinio dispergavimo efektyvumą galima padidinti, dujas veikiant ultragarsu.

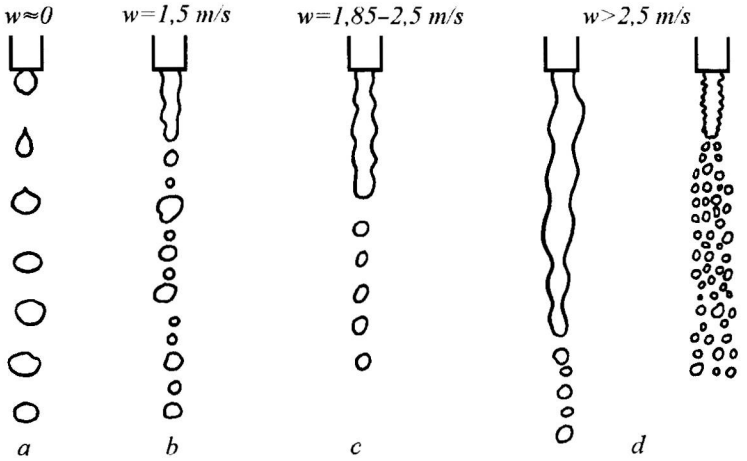
Skysčio čiurkšlės ir plėvelės skaidomos disperguojant skystį įvairiais būdais. Skysčio čiurkšlė dažniausiai suyra dėl išorinių ir vidinių veiksnių atsiradus skystyje svyravimo procesams. Prie išorinių veiksnių priskiriamos aerodinaminės jėgos, besistengiančios deformuoti ir suardyti čiurkšlę, o prie vidinių – sudirginimas, sąlygojamas dispergavimo aparato gamybos kokybės, jo virpesių, konstrukcijos ypatumų ir t. t.

Skysčio čiurkšlės suardymo procesui taip pat turi įtakos skysčio ir aplinkos fizikinės savybės. Aplinka gali būti ne tik dujos, bet ir skystis, pvz., gaminant emulsijas. Kuo didesnė skysčio klampa, tuo labiau stabilizuojami (apsunkinami) bangavimo reiškiniai ir dispergavimas. Padidinus paviršiaus įtemptį, skysčio čiurkšlė skaidosi lėčiau.

Iš dispergavimo elemento ištekančio skysčio smulkinimo mechanizmas dažniausiai priklauso nuo ištekančios čiurkšlės formos ir čiurkšlės bei aplinkos greičių santykio.

Hidraulinio dispergavimo metu supančių dujų arba skysčio greitis mažesnis už smulkinamo srauto ištekėjimo greitį. Iš dispergavimo elemento skystis dažniausiai išteka cilindro formos čiurkšle arba skirtingos formos plėvele.

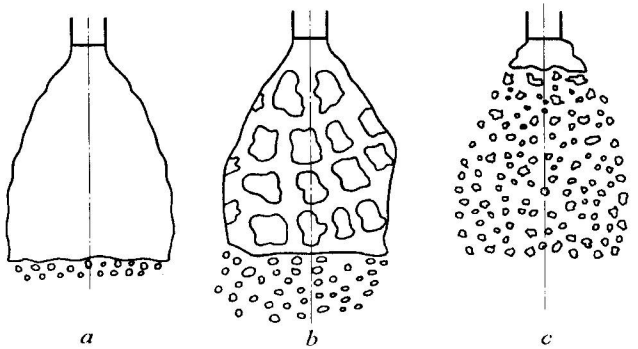
Palaipsniui nuo nulinės vertės didinant skysčio ištekėjimo iš antgalio greitį, matyti, kaip skaidosi cilindrinė čiurkšlė (6.23 pav.). Pradžioje skystis iš antgalio tik laša (6.23 pav., *a*). Padidinus greitį iki 1,5 m/s, atsiranda trumpų čiurkšlių, lašai darosi nevienodi (6.23 pav., *b*). Atitrūkęs lašas pagal čiurkšlės ilgį nevienodai išsiplečia. Dėl čiurkšlės viduje esančio slėgio jos skersmuo didėja. Gretimų dalelių skerspjūviui padidėjus arba sumažėjus atsiranda dalelių stambumo netolygumų, padaugėja stambios frakcijos dalelių. Ištekėjimo greičiui pasiekus 1,85...2,5 m/s, lašai darosi panašaus dydžio (6.23 pav., *c*). Kai ištekėjimo greitis viršija 2,5 m/s, susidaro ilgiausia čiurkšlė (6.23 pav., *d*), tačiau vienodo skersmens dalelių skaičius šiuo atveju sumažėja, atsiranda papildomų mažų lašelių – „palydovų". Didėjant ištekėjimo greičiui, tokių „palydovų" daugėja, taip pat didėja ir stambių lašelių skaičius.



6.23 pav. Cilindrinės čiurkšlės suirimas, esant skirtingiems ištekėjimo iš antgalio greičiams

Čiurkšlė ilgėja, mažėjant skysčio paviršiaus įtempčiai ir klampai. Didėjant skysčio paviršiaus įtempčiai ir klampai, didėja čiurkšlei yrant susidarančių lašelių skersmuo.

Plokščios skysčio plėvelės suirimas yra sąlygojamas dviejų priežasčių: 1) atskirų angų atsiradimo plėvelėse. Angų skaičius ir skersmuo didėja, iki susidaro plonų čiurkšlių tinklelis, kuris virsta daugybe mažų lašelių (6.24 pav., *a* ir *b*); 2) nestabilių bangų susidarymo plėvelėje. Bangų amplitudė didėja, tolstant nuo antgalio briaunos. Dėl bangų susidarymo plėvelės virsta lygiagrečiomis čiurkšlėmis, o šios – lašeliais (6.24 pav., *c*).



6.24 pav. Plokščios plėvelės suirimo schema, didinant skysčio ištekėjimo iš antgalio greitį

Mechaninio, kaip ir hidraulinio, dispergavimo metu smulkinama skysčio čiurkšlė arba plėvelė. Plėvelės ir čiurkšlės smulkinimo ir lašelių susidarymo procesai artimi anksčiau aprašytiems.

Pneumatiškai disperguojant gautos čiurkšlės suirimą lemiantis veiksnys yra iš kanalo dideliu greičiu (50...300 m/s) ištekančio dujų srauto ir gerokai mažesniu greičiu judančios skysčio čiurkšlės tarpusavio sąveika. Atsiradus trinčiai tarp skysčio ir dujų srautų, skysčio čiurkšlė lyg ištempiama į atskirus siūlus. Šie siūlai per ploniausias vietas sutrūksta ir susidaro daug smulkių lašelių. Statiškai nestabilios siūlų formos čiurkšlės išsilaikymo trukmė priklauso nuo dujų ir skysčio srautų greičių skirtumo (kuo skirtumas didesnis, tuo siūlas plonesnis, tuo trumpiau jis išsilaiko ir tuo smulkiau suskaidomas) ir nuo skysčio fizikinių savybių.

6.12.2. Lašų smulkinimas

Iš dispergavimo elemento ištekantys lašai susiduria su terpe, kuri juos gali deformuoti arba susmulkinti. Sąveikai turi įtakos lašelių judėjimo nenuostovumas. Terpė lašelių judėjimą gali stabdyti arba greitinti. Kadangi pradinis dispergavimas yra polidispersinis, dalelės tam tikru atstumu nuo dispergavimo elemento yra skirtingo dydžio. Skirtingo dydžio dalelės įgauna skirtingą greitį ir dėl to dažnai tarpusavyje susiduria. Susidūrimų būna ir dėl lašelių judėjimo

trajektorijų susikirtimo tuo pačiu metu dirbant keliems arti vienas kito esantiems dispergavimo elementams.

Panagrinėsime lašelių osciliacijos (svyravimo) ir skysčio cirkuliacijos lašeliuose sąvokas.

Lašeliai ima svyruoti veikiami supančios terpės jėgos, kuri stengiasi lašeliui suteikti tokią formą, kad jo hidraulinis pasipriešinimas būtų minimalus, o slėgis ir mikrobangos pasiskirstytų paviršiuje, ir paviršiaus įtempties jėgos, iš lašelio formuojančios rutulį. Osciliaciją skatina ir kitos jėgos, atsirandančios sukantis dalelei.

Nustatyta, kad lašelio viduje cirkuliacija prasideda tik tada, kai nurodyto dydžio lašelį aptekančios terpės reliatyvusis greitis w_r pasiekia nustatytą vertę.

Šis klausimas labai svarbus analizuojant masės pernešimą, todėl panagrinėsime jį smulkiau.

Pagal nurodytą principą lašeliai skirstomi į mažo skersmens, kuriuose skystis necirkuliuoja, ir didelio skersmens, kuriuose vyksta cirkuliacija. Prasidėjusi skysčio cirkuliacija pamažu gali sustoti, kai pastovaus dydžio lašeliai iš didelių lašelių grupės palaipsniui pereina į mažų lašelių grupę.

Kritinis lašelių skersmuo, atitinkantis nagrinėjamą sąlyginę ribą, gali būti apskaičiuotas pagal kriterijų lygtį:

$$\frac{\sigma}{d_{kr}\cdot\rho_{sk}} = 1{,}25\cdot 10^{-3}\cdot\left(\frac{w_r\cdot\mu_d}{\sigma}\right)^{0{,}78}\cdot\left(\frac{\sigma^3\cdot\rho_d^2}{\mu_d\cdot\rho_{sk}\cdot g}\right)^{0{,}42}. \qquad (6.102)$$

Skersmenį d_{kr} atitinka kritinė Re_{kr} vertė, apskaičiuota pagal tokią lygtį:

$$Re_{kr} = 4{,}55\cdot\left[\frac{\sigma^3\cdot\rho_d^2}{\mu_d^4\cdot(\rho_{sk}-\rho_d)\cdot g}\right]. \qquad (6.103)$$

Pvz., ore vandens lašelių $Re_{kr} = 1000$.

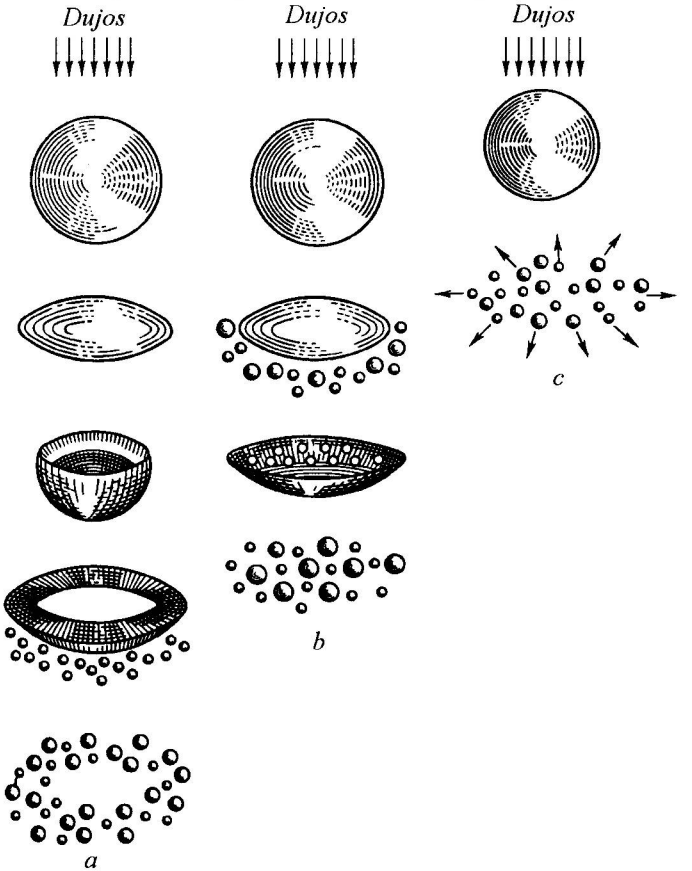
Kai $d_l > d_{kr}$, ne tik prasideda skysčio cirkuliacija lašelyje, bet ir keičiasi jo aptekėjimo režimas, nes padidėja hidraulinio pasipriešinimo koeficientas.

Lašeliai pradeda smulkėti, atsiradus už jų trūkiajam terpės tekėjimui. Kiekybiniam lašelio stabilumo lygiui nustatyti daugeliu atvejų naudojamas Vėberio kriterijus $We = w^2\cdot d_l\cdot\rho/\sigma$, nusakantis terpės hidraulinio poveikio lašeliui jėgų ir paviršiaus įtempties jėgų santykį. Vėberio kriterijaus vertę, atitinkančią lašelio smulkėjimo pradžią, įprasta vadinti kritine Vėberio kriterijaus verte We_{kr}. Tačiau nurodant skaitines vertes autorių nuomonės nesutampa, ir tai gali būti paaiškinta lašelių smulkėjimo pradžios priklausomybe nuo skysčio klampos, terpės veikimo trukmės ir kai kurių kitų veiksnių. Taigi galima padaryti išvadą, kad lašelių stabilumą lemia ne tik Vėberio kriterijus.

Įvertinti įvairius veiksnius pasisekė nustačius Vėberio kriterijaus ryšį su: 1) Reinoldso kriterijumi (nusakančiu lašelio aptekėjimo režimą); 2) Laplaso kriterijumi (nusakančiu klampos ir paviršiaus įtempties jėgų santykį); 3) terpės ir lašelių tankio bei klampos santykiu:

$$We_{kr} = 0{,}5 \cdot Re_{kr}^2 \cdot (\mu_d / \mu_{sk})^2 \cdot (\rho_{sk} / \rho_d) \cdot Lp^{-1}. \qquad (6.104)$$

Tačiau ir šie parametrai įvertina ne visus lašelių smulkėjimo veiksnius.



6.25 pav. Lašų smulkinimo stadijos, esant skirtingiems jų apipūtimo dujomis greičiams: *a* – paprastas smulkinimas, *b* – smulkinimas atitrūkstant paviršiaus sluoksniui, *c* – smulkinimas sprogdinant

Smulkinant lašus reliatyviojo greičio mažėjimo sąlygomis iš jų formuojasi „krepšeliai“: apipučiamoji lašo pusė įspaudžiama į lašo vidų ir proceso pabaigoje susidaro skysčio plėvelė, iškila srauto kryptimi. Vėliau ši plėvelė susprogsta ir susidaro daugybė mažų lašelių ir torų, kuriose telpa apie 70 % pradinių lašų masės (6.25 pav., *a*).

Susidarius tiek didelės, tiek mažos klampos skysčių lašų krepšeliams, sumažėja aerodinaminis pasipriešinimas, kompensuojantis dinaminio slėgio aukštį. Jeigu dujų greitis daug didesnis už kritinį, skysčio disko formos viršutinis sluoksnis nuo pučiamo dujų srauto pusės sprogsta ir susidaro daug mažų lašelių. Esant kritinei lašo deformacijai (kritiniam greičiui), diske atsiranda skylučių ir lašas suskyla į keletą mažesnio dydžio lašelių (6.25 pav., *b*).

Lašas, veikiamas galingų slėgio ir greičio impulsų, pvz., judėdamas viršgarsinio greičio sraute, gali sprogti ir taip susmulkėti (6.25 pav., *c*).

Galimi tokie lašų smulkinimo režimai:

1) kai $4 \le We < 20$ ir $0{,}61 \le We \cdot Re^{-0.5} \le 0{,}8$, galimas paprastas dalijimasis, kai krepšelis suskyla į 2...4 lašus, ir chaotiškas smulkinimas, kurio metu susidarę antriniai lašeliai būna panašaus dydžio (pagal dydžio eilę) kaip ir pagrindiniai lašeliai;

2) kai $10 \le We \le 10^4$ ir $0{,}5 \le We \cdot Re^{-0.5} \le 10$, lašeliai smulkėja sprogstant paviršiniam sluoksniui; susidarę labai smulkūs lašeliai egzistuoja kartu su stambiais lašeliais, atskilusiais nuo pradinių lašelių;

3) kai $10^3 \le We \le 10^5$ ir $10 \le We \cdot Re^{-0.5} \le 100$, lašeliai sprogdami suskyla į lašelius, daug mažesnius už pradinius.

Pateiktos kriterijų vertės leidžia nustatyti lašelių suskilimo būdą ir vienu ar kitu laipsniu įvertinti jų paviršių dydį ir formą.

Realiuose pramoniniuose cheminės technologijos aparatuose, kuriuose skysčiai disperguojami, *We* kriterijus dažniausiai būna mažesnis už 10, t. y. atitinka pirmąjį smulkinimo režimą.

6.13. Neniutoninių skysčių tekėjimas

Skysčiai, kurie yra aprašomi Niutono vidinės trinties dėsniu ((3.12) lygtis) ir kurių klampa μ nepriklauso nuo greičio gradiento ir, esant pastoviai temperatūrai, yra pastovi, vadinami niutoniniais. Prie niutoninių skysčių priskiriamos visos dujos ir švarūs mažos molekulinės masės skysčiai bei jų mišiniai. Jeigu skystis neaprašomas Niutono dėsniu ir tangentiniai įtempiai išreiškiami už (3.12) lygtį sudėtingesnėmis priklausomybėmis, tokie skysčiai vadinami neniutoniniais. Tai polimerų tirpalai, koloidiniai tirpalai, suspensijos ir t. t. Neniutoninių skysčių struktūrą lemia jų dalelių tarpusavio sąveika. Nukrypus tokiems skysčiams (sistemoms) nuo pusiausvyros, jų struktūra pažeidžiama, o savybės priklauso nuo veikiančios jėgos dydžio ir deformacijos greičio.

Neniutoninių skysčių deformacijos ir judėjimo dėsnius nagrinėja mokslas, vadinamas reologija.

Neniutoninių skysčių klasifikacija ir reologinės savybės. Norint išvesti neniutoninių skysčių tekėjimą aprašančias lygtis, reikia nustatyti ryšį tarp skysčio sluoksnių vidinės trinties įtempių ir deformacijos greičio. Tangentiniai įtempiai τ_T yra greičio gradiento funkcija:

$$\tau_T = f(dw_x/dy). \tag{6.105}$$

Kadangi $w_x = dx/d\tau$, tai (6.105) lygties dešiniąją pusę galima užrašyti taip:

$$\frac{dw_x}{dy} = \frac{d}{dy}\left(\frac{dx}{d\tau}\right) = \frac{d}{d\tau}\left(\frac{dx}{dy}\right) = \frac{d\gamma}{d\tau}; \tag{6.106}$$

čia $\gamma = dx/dy$ – vietinė deformacija; τ – trukmė.

Deformacija γ nagrinėjamame taške nusako santykinį įtempių pasislinkimą x ašies kryptimi, pasikeitus ordinatei y dydžiu dy. Tada (6.106) lygtis užrašoma taip:

$$dw_x/dy = d\gamma/d\tau = f_1(\tau_T). \tag{6.107}$$

(6.105)...(6.107) lygčių išraiška priklauso nuo neniutoninių skysčių reologinių savybių.

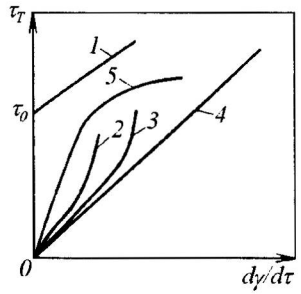
Neniutoniniams skysčiams apibūdinti vartojama „tariamosios" klampos sąvoka. Tai klampa neniutoninių skysčių, kurių deformacijos greitis, veikiant žinomam šlyties įtempiui, lygus nagrinėjamo neniutoninio skysčio deformacijos greičiui. Neniutoninių skysčių tariamosios klampos μ_t ryšys su jų reologinėmis savybėmis gali būti išreikštas tokia lygtimi:

$$\tau_T = f(d\gamma/d\tau) = -\mu_t \cdot d\gamma/d\tau. \tag{6.108}$$

Neniutoniniai skysčiai skirstomi į tris pagrindines grupes.

Pirmajai grupei priskiriami klampūs arba nuostovūs neniutoniniai skysčiai, kuriems (6.105) lygtis galioja nepriklausomai nuo tekėjimo trukmės (6.27 pav.). Pagal tekėjimo kreivių formą skiriami tokie šios grupės skysčiai: klampiai plastiški (Bingamo), pseudoplastiniai ir dilatantiniai.

Klampiai plastiški skysčiai (6.26 pav., 1 kreivė) pradeda tekėti tik veikiami įtempių τ_0 (τ_0 – pradinis šlyties įtempis arba takumo riba), viršijančių takumo ribą. Tokių įtempių veikiamų plastinių skysčių struktūra suyra ir jie teka kaip niutoniniai, t. y. τ_T priklausomybė nuo $d\gamma/d\tau$ tampa tiesinė. Sumažėjus įtempiams ($\tau_T < \tau_0$), klampiai plastiški skysčiai atgauna struktūrą. Prie klampiai plastiškų skysčių priskiriamos tirštos suspensijos, įvairios pastos, aliejiniai dažai ir kt.



6.26 pav. Įvairių tipų skysčių reologinė charakteristika:
1 – klampiai plastiškų, *2* – neniutoninių, *3* – dilatantinių, *4* – niutoninių, *5* – pseudoplastinių

Klampiai plastinių skysčių tekėjimo lygtis

$$\tau_T - \tau_0 = -\mu_p \cdot d\gamma/d\tau \qquad (\text{kai } \tau_T > \tau_0); \qquad (6.109)$$

čia μ_p – plastinė klampa.

Pseudoplastiniai skysčiai (6.26 pav., 5 kreivė) nagrinėjamoje neniutoninių skysčių grupėje yra plačiausiai paplitę. Prie jų priskiriami polimerų ir celiuliozės tirpalai, asimetrinės struktūros dalelių suspensijos ir t. t. Jie, kaip ir niutoniniai skysčiai, pradeda tekėti, esant labai mažoms τ_T vertėms. Šių skysčių šlyties įtempių priklausomybė nuo deformacijos greičio gali būti užrašyta laipsnine funkcija:

$$\tau_T = k \cdot (d\gamma/d\tau)^n; \qquad (6.110)$$

čia k ir n – konstantos. k vertė priklauso nuo skysčio konsistencijos ir didėja, didėjant klampai; n parodo neniutoninio skysčio savybių nukrypimą nuo niutoninio skysčio savybių.

Skysčiai, kurių reologinės charakteristikos užrašomos (6.110) lygtimi, kai kada vadinami laipsniniais.

Pseudoplastinių skysčių $n < 1$ (niutoninių skysčių $n = 1$ ir atitinkamai $k = \mu$), t. y. tariamoji klampa mažėja, didėjant deformacijos greičiui. Tekėjimo kreivė palaipsniui virsta tiese, kurios $\mu_t = \infty$, esant be galo dideliam deformacijos greičio gradientui $d\gamma/d\tau$.

Dilatantinių skysčių (6.26 pav., 3 kreivė) sudėtyje yra tiek skystosios fazės, kad, skysčiui esant ramybės būsenos arba lėtai tekant, ji užpildo tuštumas tarp kietosios fazės dalelių. Didėjant greičiui, kietosios fazės dalelės greičiau pasislenka viena kitos atžvilgiu, dalelių tarpusavio trinties jėga didėja, kartu

didėja tariamoji klampa. Dilatantiniams skysčiams (6.110) lygties laipsnio rodiklis $n > 1$. Prie dilatantinių skysčių priskiriamos krakmolo ir kalio silikato suspensijos, įvairūs klijai ir kt.

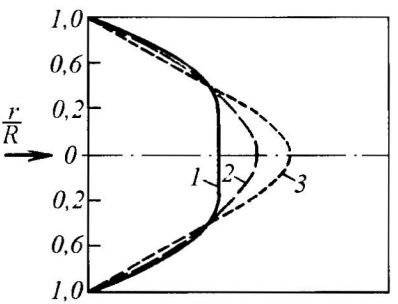
Antrajai grupei priskiriami neniutoniniai skysčiai, kurių charakteristikos priklauso nuo tekėjimo trukmės. Tokių skysčių tariamoji klampa μ_t priklauso ne tik nuo deformacijų gradiento, bet ir nuo veikimo trukmės. Tai apsunkina šių skysčių tekėjimo proceso analizę, kadangi skysčio klampai nustatyti reikia žinoti jo cheminę kilmę. Šie skysčiai skirstomi į tiksotropinius, kurių tariamoji klampa, ilgėjant tekėjimo trukmei, mažėja, ir reopektaninius, kurių tariamoji klampa, ilgėjant tekėjimo trukmei, didėja.

Prie tiksotropinių skysčių priskiriama daugelis dažų, kai kurie maisto produktai (kefyras, pasukos ir t. t.), kurių klampa plakant mažėja. Reopektaniniais skysčiais galima laikyti bentonitinių molių suspensijas ir kai kuriuos koloidinius tirpalus.

Trečiajai grupei priskiriami klampiai tamprūs arba Maksvelio skysčiai. Veikiant įtempiams, šių skysčių tariamoji klampa mažėja; nustojus veikti įtempiams, skysčiai iš dalies atgauna savo formą. Prie šio tipo skysčių priskiriami kai kurie tešlos konsistencijos bitumai, dervos ir pastos.

Neniutoninių skysčių reologinėms savybėms aprašyti specialioje literatūroje yra pasiūlyta daug modelių ir empirinių lygčių.

Neniutoninių skysčių hidrodinamika. Neniutoninių skysčių judėjimo dėsningumų negalima aprašyti Navjė ir Stokso lygtimis, kadangi tariamoji klampa priklauso nuo judėjimo greičio ir todėl srauto skerspjūvyje keisis ne tik srauto greitis, bet ir tariamoji klampa. Neniutoninių skysčių judėjimo lygčių išvedimas pateikiamas specialioje literatūroje.



6.27 pav. Įvairių skysčių laminarinio tekėjimo greičių epiūra:
1 – pseudoplastinių, *2* – niutoninių, *3* – dilatantinių; *R* – kanalo spindulys, *r* – momentinis srauto spindulys

Kadangi neniutoninių skysčių tariamoji klampa yra palyginti didelė, todėl jiems būdingas laminarinis tekėjimas. Tam tikromis sąlygomis neniutoni-

nių skysčių tekėjimas gali tapti turbulentinis. Tačiau nustatyti perėjimo į turbulentinį tekėjimą sąlygas labai sunku. Tai aiškinama tuo, kad kanalo ašyje pasikeitus vidinės trinties tangentiniams įtempiams nuo nulio iki didžiausios vertės, prie kanalo sienelės taip pat pasikeis ir klampa, nuo kurios priklauso *Re* kriterijus.

6.27 pav. pavaizduota greičio epiūra skysčių, kurių elgsena, esant laminariniam tekėjimui, apibūdinama laipsniniu reologijos dėsniu ((6.110) lygtis). Matyti, kad ir greičių epiūra pagal neniutoninių skysčių srauto skerspjūvį dėl skysčių struktūros savitumo turėtų būti savita. Šiuo atveju pseudoplastinių skysčių laipsnio rodiklis $n = 1/3$ (1 kreivė), niutoninių skysčių $n = 1$ (2 kreivė) ir dilatantinių skysčių $n = 3$ (3 kreivė).

Esant laminariniam neniutoninių skysčių, kurių reologinės charakteristikos nepriklauso nuo judėjimo trukmės, tekėjimui, hidraulinis pasipriešinimas gali būti skaičiuojamas pagal (6.25) lygtį, kuri buvo išvesta niutoniniams skysčiams. Šiuo atveju trinties koeficientas λ apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\lambda = 64/Re';$$

čia $Re' = \dfrac{w^{2-n} \cdot d^n \cdot \rho}{(k/8) \cdot \left[(6n+2/n)^n\right]}$ – modifikuotas Reinoldso kriterijus.

Kai $n = 1$ ir $k = \mu$, modifikuotas Reinoldso kriterijus tampa paprastu Reinoldso kriterijumi.

Plačiau neniutoninių skysčių reologija ir hidrodinamika nagrinėjama specialioje literatūroje.

7 dalis

MAIŠYMAS

Skysčių, pastos konsistencijos ir kietų birių medžiagų maišymas yra vienas dažniausiai taikomų technologinių procesų. Technologiniuose procesuose galutiniai produktai dažnai gaminami iš atskirai paruoštų ir dozuotų kelių komponentų mišinių. Kokybiškus, vienodų techninių savybių produktus galima pagaminti tik iš gerai sumaišytų pradinių medžiagų arba žaliavų mišinių. Prieš maišymą atskiri komponentai būna segreguoti (susitelkę tam tikroje mišinio vietoje), todėl mišinio cheminė sudėtis ir fizikinės savybės įvairiuose mišinio taškuose yra nevienalytės. Produkto savybių stabilumui neigiamą įtaką taip pat daro pradinio mišinio cheminės sudėties nevienodumai (cheminės fliuktuacijos), kurie mažinami maišant. Maišant taip pat didinamas mišinį sudarančių komponentų fazių sąlyčio paviršius, todėl didėja tarpusavio reakcijų intensyvumas.

Pagrindinis maišymo tikslas – gauti maksimalaus skirtingų komponentų fazių sąlyčio paviršių ir vienalytį mišinį. Šis tikslas turi būti pasiektas mažiausiomis energijos sąnaudomis, tinkamai parenkant maišymo būdą, naudojamą aparatą, maišymo intensyvumą ir trukmę.

Dažniausiai pramonėje maišomi skysčiai arba maišoma skysčiuose, ir tai yra hidrodinamikos procesas. Taip pat maišomos ir birios kietos medžiagos, bet čia jau yra mechaninis procesas, todėl jis nagrinėjamas mechaninių procesų dalyje.

Skysčių maišymas yra daugkartinis skysčio tūrio makroelementų maišymas, veikiant mechanine maišykle arba dujų ir skysčio čiurkšle maišomai medžiagai perduodamu impulsu.

Skysčiai maišomi, kai reikia: 1) suintensyvinti šilumos ir masės mainus, tarp jų ir vykstančius kartu su chemine reakcija; 2) tolygiai paskirstyti: skystyje kietos medžiagos daleles (ruošiant suspensijas); iki pasirinkto dispersiškumo skysčius skysčiuose (ruošiant emulsijas); dujas skysčiuose (barbotuojant).

Aparatai su maišikliais plačiai naudojami atliekant garinimo, kristalizacijos, sorbcijos, ekstrakcijos ir kitus tipinius technologinius procesus.

Maišant aparatų užpildymo terpėje, temperatūros ir koncentracijos gradientai artėja prie minimalios vertės. Aparatuose su maišyklėmis srauto hidrodinaminė struktūra artima idealaus sumaišymo modeliu apibūdinamai srauto struktūrai.

Skysčiai maišomi įvairiais būdais: sukamuoju arba svyruojamuoju maišiklio judėjimu (mechaninis maišymas); dujų barbotažu per skysčio sluoksnį (pneumatinis maišymas); skysčio transportavimu per turbulentinę įkrovą; siurbliu transportuojant skystį uždaru kontūru (cirkuliacinis maišymas).

Maišymo procesas apibūdinamas intensyvumu, efektyvumu, taip pat energijos sąnaudomis maišymui.

Maišymo intensyvumas nusakomas energijos kiekiu N, kurį per laiko vienetą gauna maišomo skysčio tūrio vienetas (J/m^3) arba masės vienetas (J/kg). Nuo maišymo intensyvumo priklauso skysčio judėjimas aparate. Didinant intensyvumą visada didėja energijos sąnaudos. Todėl maišymo intensyvumą reikia nustatyti tokį, kad minimaliomis energijos sąnaudomis būtų pasiektas maksimalus technologinis efektas (pvz., gaunamas vienalytis mišinys). Intensyvinant maišymo procesą, padidėja tiriamojo aparato našumas arba sumažėja projektuojamojo aparato tūris. Maišymo efektyvumu suprantamas maišymo proceso kokybę apibūdinantis maišymo proceso efektas. Priklausomai nuo maišymo paskirties efektyvumas išreiškiamas įvairiais būdais. Pavyzdžiui, kai maišoma norint suintensyvinti šilumos ir masės mainus arba cheminius procesus, maišymo efektyvumą galima išreikšti šilumos ir masės perdavimo arba kinetinių koeficientų, maišant ir nemaišant, santykiu. Ruošiant suspensijas ir emulsijas, maišymo efektyvumas apibūdinamas fazių pasiskirstymo suspensijose ir emulsijose tolygumu.

Maišymo kokybė (efektyvumas) dažniausiai nusakoma šiais netiesioginiais mišinio homogeniškumo rodikliais: komponento koncentracija, tirpalo elektros laidumu, tankiu, šilumos arba masės perdavimo koeficientu, granuliometrine sudėtimi (tik kietų birių medžiagų mišinių) ir kt. Po tam tikros maišymo trukmės iš įvairių mišinio vietų paimami mėginiai ir, nustatomas vienas iš šių rodiklių ir gaunamas rodiklių verčių masyvas $X\{N\}$ (N – mėginio ėmimų (matavimo rezultatų) skaičius).

Apdorojant gautus rezultatus, nustatoma vidutinė rodiklio vertė $\overline{X}$, atskirų verčių vidutinė kvadratinė sklaida apie vidutinę vertę s^2 ir varijavimo koeficientas v, %:

$$\overline{X} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} X_i , \qquad (7.1)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(X_i - \overline{X}\right)^2}{(N-1)}, \qquad (7.2)$$

$$v = 100 \cdot s/\overline{X}\,. \qquad (7.3)$$

Maišymas tuo efektyvesnis, kuo mažesnė v vertė gaunama per tą pačią maišymo trukmę. Realiuose technologiniuose procesuose sumaišymo kokybė laikoma gera, kai $v = 3...4$ %, o kai $v = 6...8$ %, – vidutinė. Didesnės v vertės rodo, kad mišinys sumaišytas prastai, o jo savybės įvairiose vietose yra skirtingos.

Papildomai masės nevienalytiškumas vertinamas nustatytų didžiausių ir mažiausių matuojamo rodiklio verčių skirtumu R arba vidutine kvadratine sklaida s^2:

$$R = X_{max} - X_{min}\,.$$

Maišant intensyviau, tomis pačiomis sąlygomis technologinio proceso reikalaujamas maišymo efektyvumas pasiekiamas greičiau. Tuomet sunaudojama mažiau energijos vienalyčio mišinio masės arba tūrio vienetui gauti.

Nustatant mišinio rodiklio vertes įvairiose mišinio vietose, po įvairios fiksuotos maišymo trukmės, galima sekti mišinio homogeniškumo didėjimo kinetiką (nubrėžti maišymo kinetikos kreives) ir nustatyti optimalią maišymo trukmę, per kurią paruošiamas vienalytis mišinys.

Tyrimais nustatyta, kad maišymo kinetikos kreivės panašios į „idealaus sumaišymo" modelio atgarsio funkcijas (žr. 5 dalį).

Kaip buvo minėta anksčiau, maišymas gali būti mechaninis, pneumatinis ir cirkuliacinis.

Toliau šioje dalyje plačiausiai bus nagrinėjamas skysčių maišymas mechaninėmis maišyklėmis, kadangi realiuose procesuose šis maišymo būdas taikomas plačiausiai.

7.1. Mechaninis maišymas

7.1.1. Skysčio judėjimas aparatuose su maišikliu

Dažniausiai naudojamos maišyklės su besisukančiu maišikliu. Dirbant tokioms maišyklėms, vyksta sudėtingas trimatis skysčio judėjimas (tangentinis, radialinis, ašinis) su vyraujančia apskritimine greičio dedamąja. Maišymo pradžioje pirmiausia susidaro tangentinis tekėjimas. Paprastai vidutinė apskritiminės (tangentinės) greičio dedamosios (w_t) vertė būna daug didesnė už vidutinę radialinės (w_r) ir ašinės, arba aksialinės, (w_a) dedamosios vertę.

Sukamajam skysčio judėjimui Navjė ir Stokso lygčių sistema užrašoma taip:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \cdot \frac{w_t^2}{r}; \quad \mu \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (w_t \cdot r)}{\partial r}\right) = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho \cdot g \; ; \; (7.4)$$

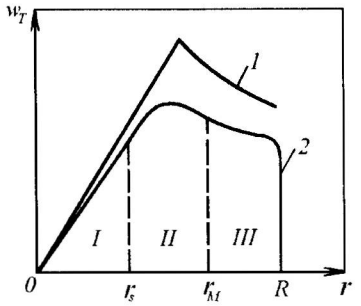
čia w_t – tangentinė greičio dedamoji, m/s; r – maišiklio spindulys, m; ρ – maišomo skysčio tankis, kg/m^3; μ – maišomo skysčio dinaminė klampa, Pa·s; p – slėgis į maišiklio mentę, Pa.

Kai sukamasis judėjimas vyksta plokštumoje apie z ašį ($w_r = 0$, $w_a = 0$), tada (7.4) lygčių sistema turi bendrą sprendinį:

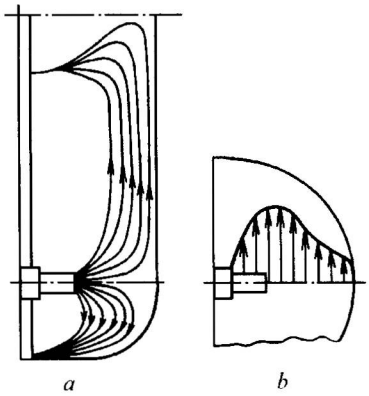
$$w_t = C_1 \cdot r + C_2 / r \; ; \qquad (7.5)$$

čia C_1 ir C_2 – integravimo konstantos.

Srityje, esančioje besisukančios skysčio masės centre, esant nuostoviajam judėjimui, $w_t = \omega \cdot r$ (čia ω – kampinis greitis). Taigi išilgai skysčio sukimosi ašies, srityje $0 < r < r_s$, susidaro cilindrinis sūkurys, kurio spindulys r_s. Iš (7.5) lygties išplaukia, kad necilindrinio sūkurio srityje $w_t = C_2 / r$. Iš čia $C_2 = \omega \cdot r_s^2$. Tada periferinėje srityje tangentinė greičio dedamoji $w_t = \omega \cdot r_s^2 / r$.



7.1 pav. Skysčio greičio tangentinės dedamosios kreivės:
1 – teorinė, *2* – eksperimentinė; *I* – centrinio cilindrinio sūkurio sritis, *II* – pereinamoji sritis, *III* – periferinė sritis



7.2 pav. Skysčio dalelių judėjimo aparate su maišykle trajektorija (*a*) ir greičių epiūra (*b*)

Aparate su besisukančiu maišikliu maišomo skysčio teorinės ir eksperimentinės tangentinės greičio dedamosios palyginimas (7.1 pav.) rodo, kad tarp centrinio sūkurio *I* ir periferinės srities *III* yra tam tikra pereinamoji sritis *II*.

Veikiant išcentrinei jėgai, atsirandančiai sukantis dideliu dažniu bet kokios konstrukcijos maišikliui, skystis nuteka nuo mentelės radialine kryptimi. Pasiekęs indo sienelę, šis srautas dalijasi į du: vienas juda į viršų, kitas – į apačią. Dėl radialinio tekėjimo pereinamojoje srityje atsiranda mažesnio slėgio zona, į kurią nukrypsta nuo laisvo skysčio paviršiaus ir nuo indo dugno tekantis skystis, t. y. atsiranda ašinis srautas, viršutinėje indo dalyje judantis iš viršaus žemyn link maišiklio.

Taigi aparate susidaro nusistovėjęs ašinis tekėjimas arba nusistovėjusi cirkuliacija (7.2 pav., *a*).

Aparate su maišikliu per laiko vienetą cirkuliuojantis skysčio tūris vadinamas siurblio efektu, kuris yra svarbi maišyklės charakteristika: kuo didesnis siurblio efektas, tuo geriau tiriamajame aparate maišosi skystis. Kai vyrauja maišyklės sudaromas radialinis srautas, siurblio efektas V_r, m^3/s, apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$V_r = \pi \cdot d_m \cdot b \cdot \overline{w}_r ; \qquad (7.6)$$

čia d_m – maišiklio skersmuo, m; b – mentės plotis, m; $\overline{w}_r$ – skysčio vidutinis radialinis greitis, m/s; $\overline{w}_r \sim d_m \cdot n$.

Kadangi geometriškai panašių maišiklių mentės pločio ir skersmens santykis b/d_m yra pastovus dydis, siurblio efektas

$$V_r = C_r \cdot n \cdot d_m^3 ; \qquad (7.7)$$

čia C_r – tiriamojo tipo maišyklės konstanta; n – maišiklio sukimosi dažnis, s^{-1}.

Kai vyrauja maišiklio sudarytas ašinis srautas, siurblio efektas V_0, m^3/s, išreiškiamas tokia lygtimi:

$$V_0 = \pi \cdot d_m^2 \cdot \overline{w}_0 / 4 ; \qquad (7.8)$$

čia $\overline{w}_0$ – vidutinis skysčio greitis ašies kryptimi, m/s; $\overline{w}_0 \sim n \cdot S$ (S – maišiklio žingsnis).

Kadangi geometriškai panašioms maišyklėms santykis $S/d_m = const$, gauname tokią išraišką:

$$V_0 = C_0 \cdot n \cdot d_m^3 ; \qquad (7.8a)$$

čia C_0 – tiriamojo tipo maišyklės konstanta.

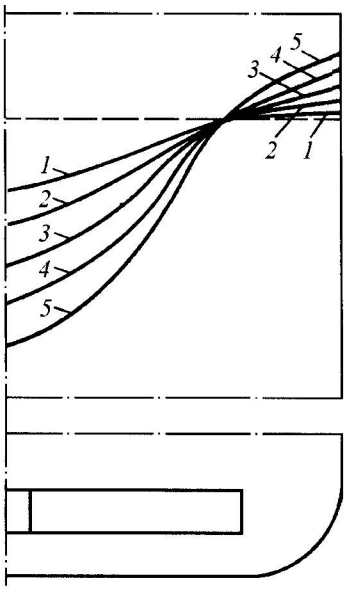
Ši išraiška yra identiška (7.7) lygčiai. (7.7) ir (7.8a) lygtyse konstantų vertės nustatomos eksperimentiškai ir pateikiamos specialiojoje literatūroje. Siurblio efektas daug priklauso nuo maišiklio konstrukcijos ir sukimosi dažnio, taip pat nuo maišomo skysčio klampos: didėjant klampai, siurblio efektas mažėja ir tai mažina maišymo proceso efektyvumą.

Modifikuotas Reinoldso kriterijus Re_m, mechaninėms maišyklėms maišant skysčius (atsižvelgiant į tai, kad $\omega = \pi \cdot d_m \cdot n$), užrašomas taip:

$$Re_m = n \cdot d_m^2 \cdot \rho / \mu . \qquad (7.9)$$

Esant laminariniam judėjimui ($Re_m < 10$), aparatuose su maišikliu susidaro silpnas trimatis tekėjimas ir laisva cirkuliacija. Centrinių cilindrinių sūkurių nėra, kadangi jų skersmuo mažesnis už maišiklio veleno skersmenį. Aparate yra periferinė ir pereinamoji tekėjimo sritys.

Srautui turbulizuojantis ($10 < Re_m < 10^3$), formuojasi priverstinė cirkuliacija ir aparate egzistuoja ne tik periferinė ir pereinamoji sritys, bet pastebima ir centrinio cilindrinio sūkurio sritis.



7.3 pav. Aparate su mentiniu maišikliu susidarančio piltuvo gylio ir formos priklausomybė nuo maišiklio sukimosi dažnio:
1 – 1,7 s^{-1}, *2* – 2,5 s^{-1}, *3* – 2,9 s^{-1}, *4* – 3,3 s^{-1}, *5* – 3,7 s^{-1}

Sustiprėjus turbulentiniam tekėjimui ($Re_m > 10^3$), priverstinė cirkuliacija sukelia intensyvų trimatį visos skysčio masės tekėjimą. Centrinių cilindrinių sūkurių sritis didėja ir susilygina su pereinamąja ir periferine sritimis.

Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad pateiktos ribinės Re_m vertės yra apytikslės ir priklauso nuo aparato ir maišiklio konstrukcijos ir geometrinių dydžių.

Sukantis mechaniniam maišikliui, skysčio paviršiuje susidaro piltuvas, kurio gylis didėja, didėjant maišiklio sukimosi dažniui (ribiniu atveju jis gali pasiekti indo dugną). Dėl to mažėja maišymo efektyvumas ir maišyklės darbo stabilumas. Piltuvo formai ir gyliui daugiausia įtakos turi maišiklio skersmuo ir sukimosi dažnis (7.3 pav.).

Kad nesusidarytų piltuvas ir užsistovėjimo zona, inde, kuriame maišoma, tam tikru atstumu nuo korpuso sienelių, įstatomos radialinės pertvaros. Eksperimentiškai nustatyta, kad optimalus pertvarų skaičius yra keturios, o jų plotis – 10 % aparato skersmens.

7.1.2. Maišyklių skaičiavimas

Maišymui reikalinga galia apskaičiuojama. Šiame skyriuje pateikiami du maišymui reikalingos galios apskaičiavimo būdai.

Pirmasis būdas. Skysčio cirkuliaciją maišyklėje pateikus kaip jo sudėtingos formos judėjimą uždaru vamzdynu, reikalingai galiai apskaičiuoti galima gauti tokią panašumo kriterijų tarpusavio priklausomybę:

$$Eu = f(Re, Fr, \Gamma_1, \Gamma_2, ...);$$

čia $Re = w_{vid} \cdot d_m \cdot \rho_{sk} / \mu_{sk}$; $Eu = \Delta p / \left(\rho_{sk} \cdot v_{vid}^2\right)$; $Fr = n^2 d_m / g$; Γ_1 , Γ_2 – parametriniai kriterijai arba simpleksai, apibūdinantys maišyklės ir maišiklio geometrinius dydžius.

Sunkio jėgos įtaka skysčio judėjimui maišyklėje nedidelė, taigi jos nepaisoma (Frudo kriterijus lygus nuliui). Tada $Eu = f(Re, \Gamma_1, \Gamma_2, ...)$.

Nusakantysis linijinis dydis šiose priklausomybėse yra maišiklio skersmuo d_m, o vietoj skysčio linijinio greičio, kurio vidutinės vertės beveik negalima nustatyti, kriterijų lygtyse imamas maišiklio mentės galo apskritiminis greitis w_{aps}, m/s:

$$w_{aps} = \pi \cdot d_m \cdot n/60;$$

čia n – sukimosi dažnis, s^{-1}.

Slėgio tarp maišiklio mentelės priekinės (fasadinės) ir užpakalinės plokštumų pokytis išreiškiamas skysčiui perduodama naudingąja galia N, Pa:

$$\Delta p = N/V_s ; \qquad (7.10)$$

čia V_s – maišomo skysčio tūris, m^3/s, išreiškiamas aparate esančio skysčio tūriu, padaugintu iš cirkuliacijos dažnio.

$$V_s = F \cdot H \cdot n_1; \tag{7.11}$$

čia F – aparato skerspjūvio plotas, m^2; H –skysčio aukštis aparate, m; n_1 – cirkuliacijos dažnis, s^{-1}.

Maišyklės matmenis išreiškiame maišiklio skersmeniu d_m, kai tarp matmenų yra tokia priklausomybė:

$$F = C_2 \cdot d_m^2; \quad H = C_3 \cdot d_m. \tag{7.12}$$

Cirkuliacijos dažnį n_1, s^{-1}, galima imti proporcingą maišiklio sukimosi dažniui:

$$n_1 = C_4 \cdot n. \tag{7.13}$$

Atsižvelgiant į tai, kad $w = w_{aps} \cdot C_1 = C_1 \cdot \pi \cdot d_m \cdot n = C_5 \cdot d_m \cdot n$, gauname modifikuota Eulerio kriterijaus lygtis:

$$Eu_m = N/\left(C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5\right). \tag{7.14}$$

Pašalinę proporcingumo koeficientus C_2, C_3, C_4 ir C_5, gauname modifikuotus Eulerio ir Reinoldso kriterijus:

$$Eu_m = N/\left(\rho \cdot n^3 \cdot d_m^5\right), \tag{7.15}$$

$$Re_m = \pi \cdot d_m \cdot \rho_{sk} / \mu_{sk}; \tag{7.16}$$

čia ρ_{sk} – maišomo skysčio tankis, kg/m^3; μ_{sk} – maišomo skysčio dinaminė klampa, Pa·s.

Tada ryšys tarp modifikuotų kriterijų išreiškiamas lygtimi

$$Eu_m = f_1\left(Re_m, \Gamma_1, \Gamma_2, \ldots\right). \tag{7.17}$$

Pertvarkę gausime supaprastintą kriterijų lygtį:

$$Eu_m = A \cdot Re_m^n \cdot \Gamma_1^a \cdot \Gamma_2^b. \tag{7.18}$$

Koeficiento A ir laipsnio rodiklių vertės priklauso nuo maišyklės tipo, maišiklio konstrukcijos, maišymo režimo ir yra nustatomos eksperimentiškai. Skaičiavimams supaprastinti eksperimentiniai duomenys pateikiami Eulerio ir Reinoldso kriterijų grafinėmis tarpusavio priklausomybėmis, atsižvelgiant į tai, kad skysčio tiekimo į aparatą ir jo išleidimo iš aparato sąlygos yra panašios.

Įvairių tipų normalizuotų maišymo aparatų priklausomybės $Eu_m = f(Re_m)$ pateiktos 7.4 pav. ir 7.1 lentelėje.

Eksperimentiškai nustatyti dėsningumai rodo, kad maišyklei reikalinga galia didėja, didėjant jos sukimosi dažniui (trečiuoju laipsniu), maišiklio skersmeniui (penktuoju laipsniu) ir maišomo skysčio tankiui bei klampai.

Maišymui reikalinga galia priklauso nuo aparato formos ir maišiklio išdėstymo jame. Kai aparatai yra ne cilindro formos, taip pat kai maišyklėje yra pertvarų, gyvatukų ir t. t., maišymui reikia didesnės galios.

Mechaninėmis maišyklėmis gali būti maišoma laminariniu arba turbulentiniu režimu. Laminariniu režimu ($Re_m < 20$) maišomi skysčiai, kurie prilimpa prie maišiklio mentelių. Intensyvaus turbulentinio maišymo atveju ($Re_m > 10^5$) Eu_m beveik nepriklauso nuo Re_m. Šioje automodelinėje srityje didinant maišiklio sukimosi dažnį, didėja maišymui reikalinga galia, bet norimas maišymo efektas nepasiekiamas.

7.4 pav. pavaizduotos priklausomybės leidžia pagal eksperimentiškai nustatytą maišymo intensyvumą nuoseklaus priartėjimo metodu parinkti maišiklio tipą, jo matmenis, sukimosi dažnį, apskaičiuoti maišiklio variklio galią.

7.1 lentelė. Maišiklių (numeracija tokia pat kaip 7.5 pav.) ir aparatų charakteristikos

Maišiklio Nr.	Maišiklio tipas	Maišyklių charakteristikos				Indo charakteristika
		D/d_m	H/d_m	b/d_m	s/d_m	
1.	Dviejų menčių	3	1	0,25	-	Be pertvarų
2.	Dviejų menčių	3	1	0,167	-	Su keturiomis pertvaromis $b = 0{,}1 \cdot D$
3.	Dviejų menčių	2	1	0,885	-	Be pertvarų
4.	Dviejų menčių	2	1	0,885	-	Su gyvatuku ($d_g = 1{,}9 \cdot d_m$; $d_v = 0{,}066 \cdot d_m$; $t = 0{,}12 \cdot d_m$)
5.	Šešių menčių	1,11	1	0,066	-	Be pertvarų
6.	Propelerinė	3	1	-	1	Be pertvarų
7.	Propelerinė	3	1	-	1	Su keturiomis pertvaromis $b = 0{,}1 \cdot D$
8.	Propelerinė	3	1	-	2	Be pertvarų
9.	Propelerinė	3	1	-	2	Su keturiomis pertvaromis $b = 0{,}1 \cdot D$

7.1 lentelės tęsinys

Maišiklio Nr.	Maišiklio tipas	Maišyklių charakteristikos				Indo charakteristika
		D/d_m	H/d_m	b/d_m	s/d_m	
10.	Atvira turbina su šešiomis plokščiomis mentėmis	3	1	(l/d_m=0,25)		Be pertvarų
11.	Atvira turbina su šešiomis plokščiomis mentėmis	3	1	0,2	-	Su keturiomis pertvaromis b = 0,1·D
12.	Atvira turbina su aštuoniomis plokščiomis, pasvirusiomis mentėmis	3	1	0,125	-	Su keturiomis pertvaromis b = 0,1·D
13.	Uždara turbina su šešiomis mentėmis	3	1	-	-	Be pertvarų
14.	Uždara turbina su šešiomis mentėmis ir kreipimo aparatu	3	1	-	-	Be pertvarų
15.	Inkaro formos	1,11	1	0,066	-	Be pertvarų
16.	Diskinė su šešiomis mentėmis	2,5	1	0,1		Su keturiomis pertvaromis b = 0,1·D

Pastaba. D – indo skersmuo, m; H – skysčio sluoksnio maišyklėje aukštis, m; b – maišiklio mentės plotis, m; s – sraigto žingsnis, m; l – mentelės ilgis, m; d_m, d_v, d_g – atitinkamai maišiklio, vamzdelio, gyvatuko skersmuo, m; t – gyvatuko žingsnis, m.

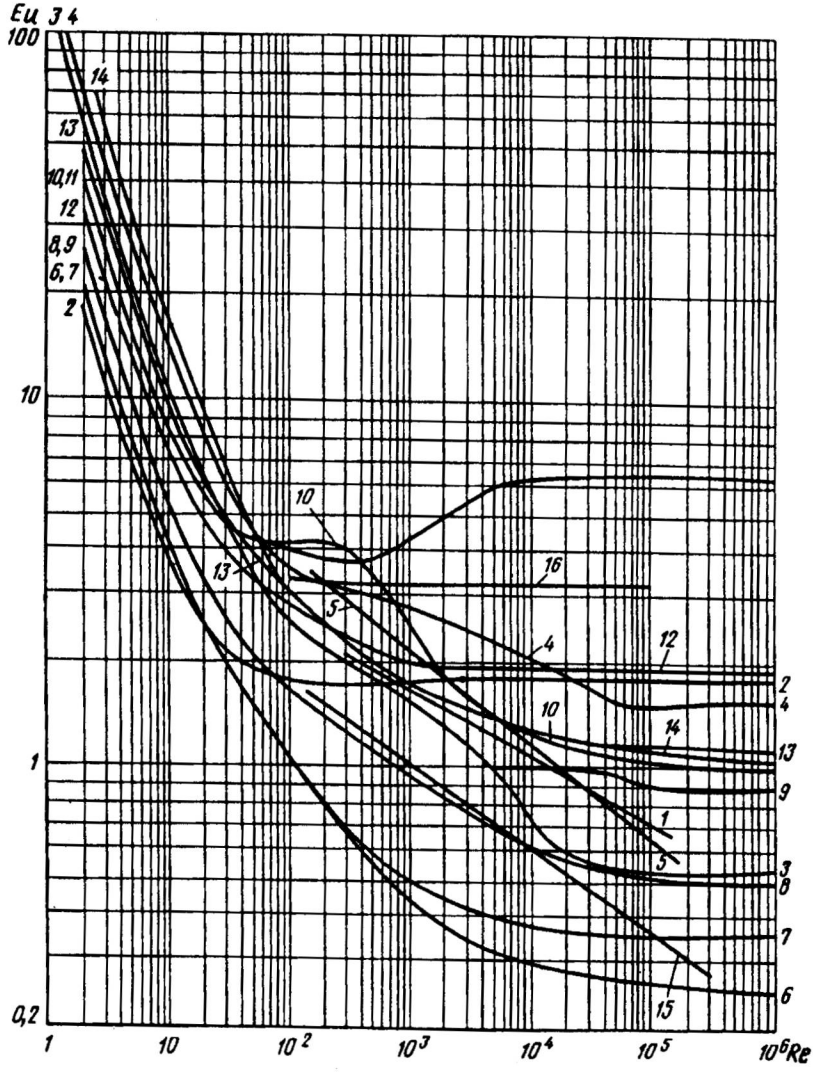
Pagal aparato darbo tūrį V_d ir reikalingą intensyvumą j apskaičiuojama maišyklei reikalinga galia N_m. Turint veikiančią maišyklę, j nustatomas eksperimentiškai išmatuojant, per kiek laiko pasiekiamas nurodytas mišinio homogeniškumas. Projektuojant naujas maišykles, j parenkamas pagal literatūroje pateiktus eksperimentinius duomenis. Tada galia N, W, apskaičiuojama taip:

$$N = j \cdot V_d \,. \tag{7.19}$$

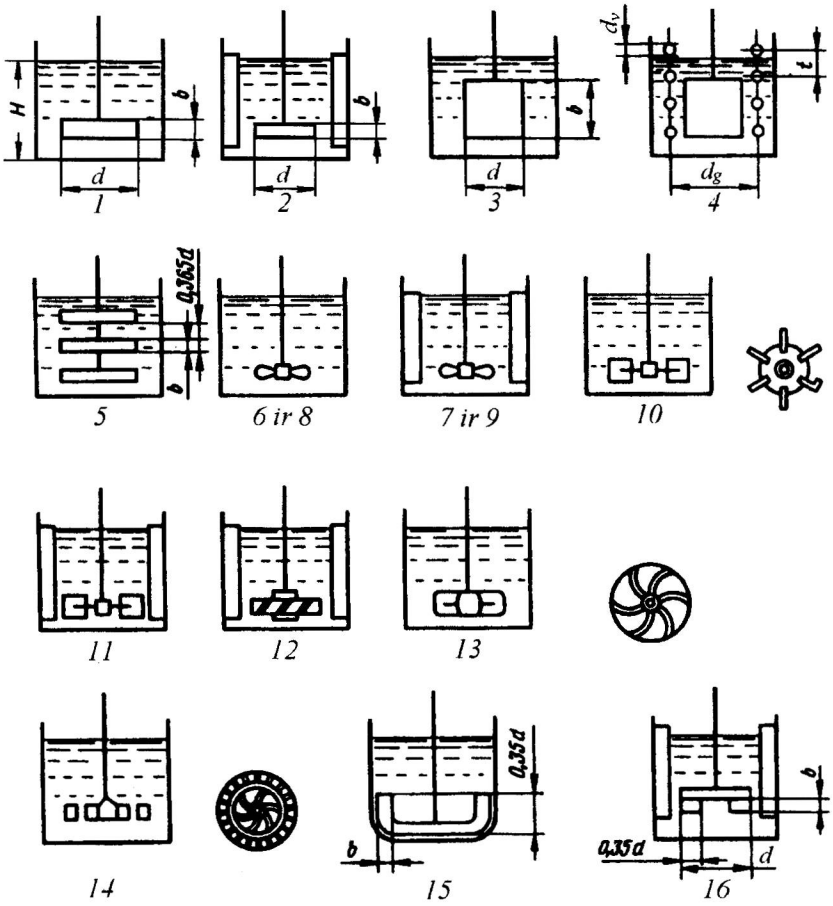
Paskui parenkamas maišiklio tipas, matmenys, sukimosi dažnis.

Pagal pasirinktus maišyklės parametrus, maišomo mišinio tankį ir klampą apskaičiuojamas Eulerio kriterijus, o pagal jį 7.4 pav. parenkamas Re_m. Pagal Re_m vertę apskaičiuojamas maišiklio sukimosi dažnis n, s^{-1}:

$$n = Re_m \cdot \mu_{sk} / \left(d_m^2 \cdot \rho_{sk}\right). \tag{7.20}$$



7.4 pav. Įvairių tipų maišyklių priklausomybės *Eu=f(Re)* grafinis vaizdas (kreivių numeracija tokia pat kaip maišiklių numeracija 7.5 pav. ir 7.1 lentelėje)



7.5 pav. Įvairių tipų maišyklės
(maišiklių numeracija tokia pat kaip 7.1 lentelėje)

Jeigu pagal šią lygtį apskaičiuotas maišiklio sukimosi dažnis bus mažesnis arba didesnis už pasirinktąjį, tai pasirenkama nauja maišiklio sukimosi dažnio vertė ir skaičiuojama tol, kol pasirinkta ir pagal (7.20 lygtį) apskaičiuota sukimosi dažnio vertės sutaps.

Variklio galia N_v, kW, apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

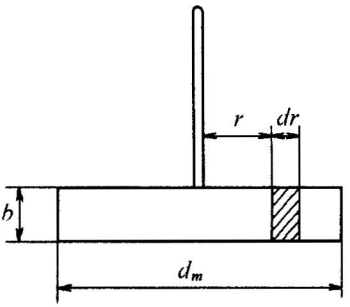
$$N_v = N/\eta\,; \tag{7.21}$$

čia η – variklio ir pavaros bendras naudingumo koeficientas.

Antrasis būdas. Nagrinėsime skysčio aptekamą maišiklio mentelę. Pagal Niutono dėsnį pasipriešinimo jėga *R*, N, apskaičiuojama taip:

$$R = \zeta \cdot F_m \cdot \rho \cdot w^2 / 2 ; \qquad (7.22)$$

čia F_m – mentelės paviršiaus plotas (7.6 pav.), lygus jos pločio b ir dvigubo spindulio r_m sandaugai, t.y. $F_m = 2 \cdot b \cdot r_m$, m^2.



7.6 pav. Maišiklio galios skaičiavimo elementai

Tarkime, kad skystis nejuda. Tada w – apskritiminis besisukančio maišiklio greitis, kuris kinta išilgai mentės, $w = \omega \cdot r$ (čia ω – kampinis greitis, r – momentinis sukimosi spindulys), arba $w = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$. Pasipriešinimo jėga dR, veikianti elementarų mentelės plotelį $dF_m = 2 \cdot b \cdot dr$, apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$dR = 2 \cdot \zeta \cdot b \cdot \rho \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot n)^2 \cdot dr / 2 . \qquad (7.23)$$

Tada maišymui reikalinga galia $dN = w \cdot dR$ lygi

$$dN = 8 \cdot \pi^3 \cdot n^3 \cdot \zeta \cdot b \cdot \rho \cdot dr \qquad (7.24)$$

arba

$$N = 8 \cdot \pi^3 \cdot n^3 \cdot \zeta \cdot b \cdot \rho \cdot \int_0^{r_m} r^3 \cdot dr = 8 \cdot \pi^3 \cdot n^3 \cdot \zeta \cdot b \cdot \rho \cdot r_m^4 / 4 . \qquad (7.25)$$

Maišiklio plotį b galima išreikšti per maišiklio skersmenį, t. y. $b = \varphi \cdot d_m$;

čia φ – nuo maišyklės geometrinių dydžių priklausantis koeficientas.

Atsižvelgdami į tai, kad $r_m = d_m / 2$, gausime:

$$N = \pi^3 \cdot \zeta \cdot \varphi \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5 / 8 . \qquad (7.26)$$

Santykį $(\pi^3 \cdot \zeta \cdot \varphi)/8$ pažymėsime K_N. Tada

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5. \qquad (7.27)$$

Iš čia

$$K_N = N/(\rho \cdot n^3 \cdot d_m^5). \qquad (7.27a)$$

Dydis K_N vadinamas galios kriterijumi, arba modifikuotu maišymo Eulerio kriterijumi; jis taip pat vadinamas išcentriniu Eulerio kriterijumi. Skysčių tekėjimo Eulerio kriterijus užrašomas ir taip: $Eu = \Delta P/(\rho \cdot w^2)$; be to, $w \sim n \cdot d$. Tada hidraulinis pasipriešinimas, sukantis maišikliui skystyje, apskaičiuojamas taip: $\Delta P \sim N/(n \cdot d_m^3)$, o maišymo Eulerio kriterijus

$$Eu_M = N/\rho \cdot (n^3 \cdot d_m^5) = K_N. \qquad (7.28)$$

Apibendrinta skysčio maišymo hidrodinamikos lygtis yra:

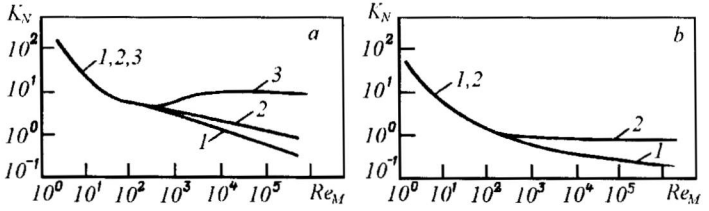
$$K_N = \varphi_1(Re_M \cdot Fr_M \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot ...); \qquad (7.29)$$

čia $Fr_M = w^2/(g \cdot d) = n^2 \cdot d_m/g$ – maišymo procesų Frudo kriterijus.

Tais atvejais, kada į sunkio jėgų poveikį neatsižvelgiama (piltuvėlis nesusidaręs arba jis labai negilus), (7.29) lygtis gali būti suprastinta ir užrašyta taip:

$$K_N = \varphi_2(Re_M \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot ...) \text{ arba } K_N = A \cdot Re_M^m \cdot \Gamma_1^p \cdot \Gamma_2^q \cdot ... \qquad (7.30)$$

A, m, p, q vertės nustatomos eksperimentiškai.



7.7 pav. Aparatų su maišyklėmis galios kriterijaus K_N priklausomybė nuo Re_M: *a* – su turbininėmis maišyklėmis (*1* – be atspindžio pertvarų, kai $D_a/d_m = 3$; *2* – tas pats, kai $D_a/d_m = 4$; *3* – su atspindžio pertvaromis, kai $D_a/d_m = 3...4$); *b* – su mentinėmis maišyklėmis (*1* – be atspindžio pertvarų; *2* – su atspindžio pertvaromis)

Eksperimentiškai nustatytos labiausiai paplitusių maišyklių K_N priklausomybių nuo Re_M kreivės pateikiamos literatūroje. Kai kurių maišyklių jos pavaizduotos 7.7 pav.

Energijos sąnaudos maišymui. Maišymui sunaudojamas energijos kiekis E, kWh, priklausomai nuo maišymo trukmės τ, h, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$E = N_v \cdot \tau ; \qquad (7.31)$$

čia N_v – maišiklio variklio galia, kW; τ – maišymo trukmė, h.

Paleidimo momentu, kada energija sunaudojama ne tik trinties, bet ir maišiklio ir maišomo skysčio inercijos jėgoms nugalėti, maišiklio naudojama galia viršija apskaičiuotąją.

Maišyklių eksploatacijos tyrimas rodo, kad paleidimo periodu maišiklio menteles veikianti skysčio jėga padidėja 2....4,5 karto. Todėl naudojami asinchroniniai elektros varikliai, kuriems leidžiamas trumpalaikis 200...300 % perkrovimas.

7.1.3. Maišyklių konstrukcija

Pagal sukimosi dažnį maišikliai sąlygiškai skirstomi į dvi grupes: 1) lėtaeigiai (pvz., inkariniai, rėminiai), kurių mentelių galų apskritiminis greitis 1...3 m/s, o sukimosi dažnis 30...90 min^{-1}; 2) greitaeigiai (pvz., propeleriniai, turbininiai), kurių menčių galų apskritiminis greitis 3...20 m/s, o sukimosi dažnis 100...3000 min^{-1}.

Kai kada maišikliai klasifikuojami pagal pagrindinio skysčio srauto kryptį (tangentinę, radialinę, ašinę), bet šis maišiklių klasifikavimo būdas labai nepaplito, nes kai kuriais atvejais sunku nustatyti skysčio greičių pasiskirstymą aparate.

Pagal konstrukciją maišikliai skirstomi į mentinius, rėminius, sraigtinius, propelerinius, juostinius, grandiklinius ir t. t.

Mentinių maišiklių teigiamybės yra paprasta jų konstrukcija, pigi gamyba ir eksploatacija, tačiau dėl silpno sukeliamo ašinio skysčio srauto jie negali visiškai sumaišyti medžiagų visame aparato tūryje. Ašinis skysčio srautas padidinamas įtaisius 30° kampu į maišiklio ašį pasvirusias menteles.

Inkariniai maišikliai yra aparato dugno formos, todėl maišymo metu nuo aparato sienelių ir dugno nuvalo nuosėdas. Jais maišomi klampūs skysčiai.

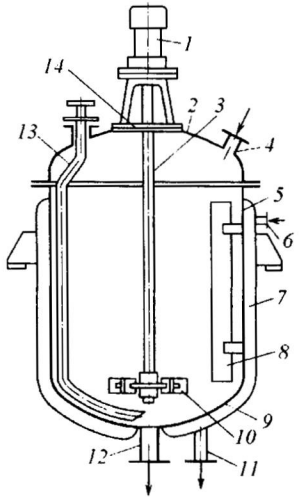
Sraigtiniai maišikliai yra sraigto formos ir, kaip ir juostiniai, naudojami klampiems skysčiams maišyti.

Propeleriniai maišikliai būna su dviem arba su trimis propeleriais. Jie pasižymi siurblio efektu ir naudojami skysčio cirkuliacijai suintensyvinti.

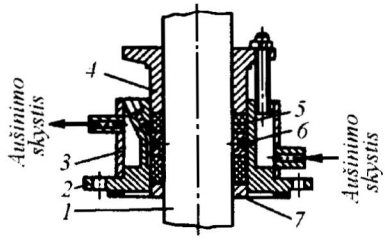
Turbininiai maišikliai gaminami turbinų ratų formos su plokščiomis, pasvirusiomis ir kreivomis mentėmis. Turbinos būna atviros ir uždaros. Uždari maišikliai turi du diskus su angomis centre skysčiui pratekėti. Norint tuo pačiu metu sudaryti radialinius ir ašinius srautus, naudojami maišikliai su pasvirusiomis mentėmis. Turbininiai maišikliai intensyviai maišo visame aparato darbiniame tūryje. Jais maišomi klampūs skysčiai, taip pat stambių dalelių suspensijos.

Dažniausiai maišymo aparatą sudaro vertikalus indas su maišikliu (7.8 pav.). Priklausomai nuo proceso, aparato su maišikliu tūris gali būti labai įvairus. Pagrindiniai šių aparatų elementai: korpusas, pavara, velenas su maišikliu, veleno sandarinimo riebokšlis (7.9 pav.).

Plačiai naudojamos vertikaliosios maišyklės, turinčios kilnojamąjį maišiklį su elektros varikliu ir pavara. Maišiklio velenas su reduktoriaus velenu dažniausiai jungiamas išilgine atjungiamąja arba krumpliaratine mova.



7.8 pav. Maišyklė:
1 – variklis su pavara, *2* – dangtelis, *3* – maišiklio velenas, *4* – suslėgtų dujų tiekimo antgalis, *5* – korpusas, *6* ir *11* – šilumnešio tiekimo ir išleidimo antgaliai, *7* – apvalkalas, *8* – atspindžio pertvara, *9* – dugnas, *10* – maišiklis, *12* – produkto išleidimo antgalis, *13* – perpylimo, sudarant slėgį, vamzdis, *14* – riebokšlis



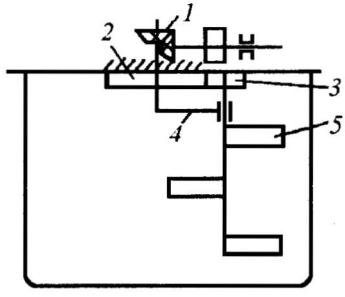
7.9 pav. Aušinamasis riebokšlis:
1 – maišiklio velenas, *2* – riebokšlio korpusas, *3* – apvalkalas, *4* – užspaudžiantysis flanšas, *5* – kamšalas, *6* – tepimo žiedas, *7* – atraminis žiedas

Dirbant maišikliui, dėl dinaminės apkrovos į konsolinį veleno galą atsiranda sukamieji svyravimai. Svyravimams pašalinti ir patikimumui padidinti maišymo induose įrengiami atraminiai arba tarpiniai guoliai.

Besisukančiam velenui sandarinti naudojami riebokšliai su minkštu arba kietu kamšalu. 7.9 pav. pavaizduotas aušinamasis riebokšlis, kurio kamšalas kartu yra ir maišiklio veleno slydimo guolis. Riebokšlio kamšalo viduje yra tepimo žiedas, leidžiantis tiekti tepalą visu veleno perimetru. Maišomi mišiniai dažnai yra šildomi arba aušinami aparato apvalkale cirkuliuojančiu šildymo arba aušinimo skysčiu.

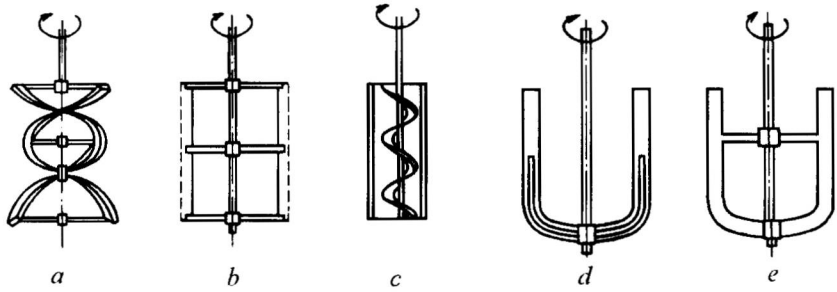
Paprastai skysčio maišymo aparato (7.8 pav.) korpusą sudaro vertikalus cilindrinis apgaubas *5*, dangtis *2*, ant kurio įtvirtinta maišiklio pavara *1*, ir dugnas *9*. Aparatai, kuriuose slėgis skiriasi nuo atmosferos slėgio, turi elipsės formos dugną ir dangtį, be to, didelio skersmens aparatų dangčiai ir dugnai dažniausiai būna privirinti, o jų vidaus apžiūrai bei valymui dangtyje įrengiami gana didelio skersmens liukai. Ant dangčio taip pat pritvirtinami atvamzdžiai *4* ir *11* medžiagoms bei dujoms tiekti ir išleisti, kontrolės ir matavimo prietaisams įrengti ir t. t. Šilumai tiekti ir aparatui aušinti įrengtas apgaubas *7*. Apsisukimams keisti tarp variklio ir maišiklio dažnai įrengiamas reduktorius.

Maišymo intensyvumą galima padidinti (ypač jeigu aparatas didelio skersmens) naudojant planetines maišykles. Jų schema pavaizduota 7.10 pav. Maišyklę sudaro mentės *5*, užmautos ant maišiklio vertikaliosios ašies, krumpliaračiai *2* (nejudamasis) ir *3* (judamasis), pavara *1* ir vediklis *4*. Pavara *1* verčia maišiklį suktis apie dvi ašis: mentės sukasi apie savo ašį ir kartu su krumpliaračiu *3* nejudamojo krumpliaračio *2* krumpliais rieda apie pavaros vertikaliąją ašį. Taigi maišoma labai intensyviai. Planetinės maišyklės būna viengubosios, dvigubosios ir trigubosios (pagal velenų skaičių).



7.10 pav. Planetinės maišyklės schema:
1 – pavara, *2* – nejudamasis krumpliaratis,
3 – judamasis krumpliaratis, *4* – vediklis, *5* – mentės

Konstrukcinis elementas, tiesiogiai priverčiantis skystį judėti, yra maišiklis. Tyrimai parodė, kad bet kokioms medžiagoms sumaišyti nereikia labai įvairių konstrukcijų maišiklių. Yra nustatytos atskirų tipų maišiklių naudojimo sritys ir geometrinių jų parametrų santykių diapazonai. Pvz., didelės klampos skysčiams maišyti laminariniu režimu naudojami juostiniai, grandikliniai, sraigtiniai maišikliai (7.11 pav., *a*, *b*, *c*). Palyginti nedidelės klampos skysčiai maišomi lėtaeigiais inkariniais ir rėminiais maišikliais (7.11 pav., *d* ir *e*).



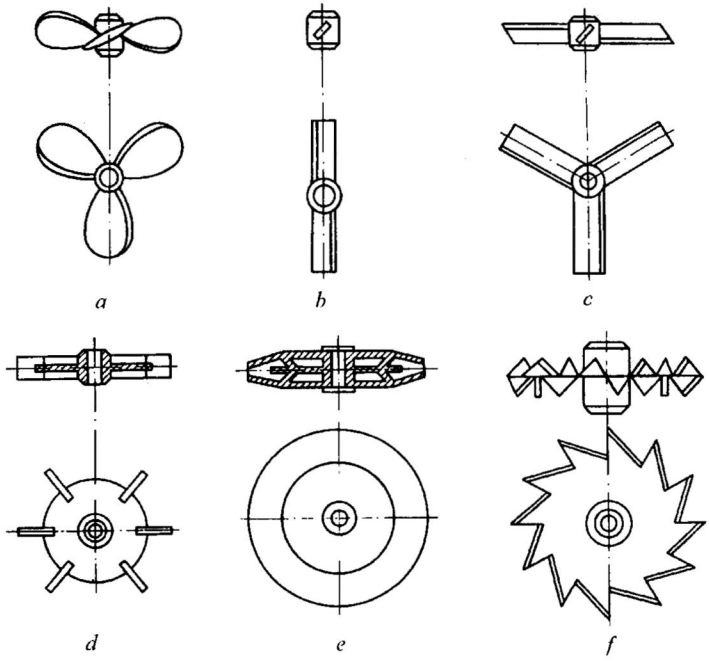
7.11 pav. Lėtaeigiai maišikliai: *a* – juostinis, *b* – grandiklinis, *c* – sraigtinis su kreipiamuoju vamzdžiu, *d* – inkarinis, *e* – rėminis

Grandikliniai maišikliai naudojami šilumos mainams intensyvinti (grandikliai tvirtinami spyruoklėmis, kurios prispaudžia juos prie korpuso sienelių).

Lėtaeigių inkarinių ir rėminių maišiklių santykis D_d/d_m yra nedidelis (1,05...1,25), todėl jie dažnai naudojami maišyti suspensijoms, kurių dalelės linkusios prilipti prie sienelių.

Greitaeigių mentinių, turbininių, propelerinių maišiklių $D_d/d_m \geq 1{,}5$. Jie gali sukelti ašinį cirkuliacinį judėjimą (siurblio efektą). Tokiuose aparatuose (juose dažniausiai nėra kitų elementų) maišikliai sudaro siurblio efektą, du kartus didesnį už paprastų (7.11 pav., *d* ir *e*) maišiklių sukuriamą siurblio efektą.

Kokios konstrukcijos maišiklį geriausia naudoti, priklauso nuo jo gamybos technologijos. Pavyzdžiui, guma arba emaliu dengiami maišikliai neturi turėti aštrių briaunų, plyšių, įdubų, nes dangos bus nepatikimos. Dengti guma patogu mentinius maišiklius, o emaliuoti – suplotų vamzdžių maišiklius. Pastaraisiais metais plačiai pradėta taikyti emaliuotus suplotų vamzdžių ir frezos formos (7.12 pav., *f*) maišiklius. Frezos formos maišiklį sudaro diskas su dantelių formos mentėmis. Jiems sukantis, susidaro didelis maišiklio mentelių ir jas aptekančio skysčio greičių skirtumas. Frezos formos maišikliai dažniausiai naudojami ruošiant smulkių dalelių suspensijas.



7.12 pav. Greitaeigiai maišikliai:
a – propeleriniai, *b* – dviejų menčių, *c* – trijų menčių, *d* – atviroji turbina, *e* – uždaroji turbina, *f* – frezos formos

Maišymo intensyvumas priklauso nuo aparatuose įrengtų nejudamųjų elementų. Pagal technologinę paskirtį šie elementai skirstomi į tris grupes: 1) elementai srautams sukelti; 2) šilumos mainų elementai; 3) technologiniai vamzdynai (skystiems ir dujiniams komponentams tiekti) ir vamzdynai matavimo ir kontrolės prietaisams išdėstyti.

Srautams sudaryti dažniausiai naudojamos atspindžio pertvaros, kurios mažina apskritiminę greičio dedamąją ir dėl to atitinkamai didėja radialinė ir ašinė dedamosios. Siurblio efektui aparate padidinti, esant tiek laminariniam, tiek turbulentiniam maišymui, naudojami nukreipiamieji vamzdžiai – difuzoriai: pirmuoju atveju jie derinami su sraigtiniu, antruoju – su propeleriniu maišikliu.

Vidiniams šilumos mainams mažesniuose negu 5 m^3 aparatuose įrengiami gyvatukai, kurių ašis sutampa su maišiklio ašimi, o didelio tūrio aparatų pakraščiuose gali būti išdėstyta keletas gyvatukų. Dviejų arba daugiau gyvatukų nereikėtų išdėstyti koncentriškai, nes erdvėje tarp gyvatukų pablogėja maišymosi ir šilumos mainų sąlygos.

7.2. Pneumatinis maišymas

Maišant šiuo būdu, per skystį leidžiamas dujų, dažniausiai oro arba garų, srautas. Garai ne tik maišo, bet kartu ir šildo. Pneumatinio maišymo teigiamybės: 1) maišymo aparate nėra judančių dalių; 2) mažos eksploatacijos išlaidos; 3) naudojant suslėgtą orą, reikalingą maišymo darbą atlieka oro turima energija.

Apytiksliai maišymo darbas W, J, gali būti prilygintas izoterminio oro suslėgimo iki slėgio aparato dugne darbui:

$$dW = P \cdot dH \; ; \tag{7.32}$$

čia P – terpės hidraulinio pasipriešinimo jėga, N.

Hidraulinio pasipriešinimo jėgą P, J, galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$P = \left(n \cdot \pi \cdot d_{vid}^3 / 6\right) \cdot \left(\rho_{sk} - \rho_d\right) \cdot g \; ; \tag{7.33}$$

čia n – dujų burbuliukų skaičius; d_{vid} – vidutinis burbuliukų skersmuo, m.

Kadangi $\rho_{sk} >> \rho_d$, tai dujų tankio galima nepaisyti. Tada

$$P = V \cdot \rho_{sk} \cdot g \; ; \tag{7.34}$$

čia $V = n \cdot \pi \cdot d_{vid}^3 / 6$ – visų aparate esančių burbuliukų tūris, m^3.

Dujų tūrį aparate papildomai veikia skysčio stulpo hidraulinis slėgis. Todėl

$$V = p_a \cdot V_s / \left(p_a + H \cdot \rho_{sk} \cdot g\right); \tag{7.35}$$

čia H – skysčio stulpo, esančio virš dujų tiekimo angos, aukštis, m; p_a – slėgis aparate virš maišomo skysčio, Pa; V_s – oro sąnaudos, esant slėgiui p_a, m^3/s.

Į (7.32) lygtį įrašę (7.35) lygtį, gauname:

$$dW = \left[p_a \cdot V_s / \left(p_a + H \cdot \rho_{sk} \cdot g\right)\right] \cdot \rho_{sk} \cdot g \cdot dH \; . \tag{7.36}$$

Suintegravę šią išraišką, gauname tokią lygtį:

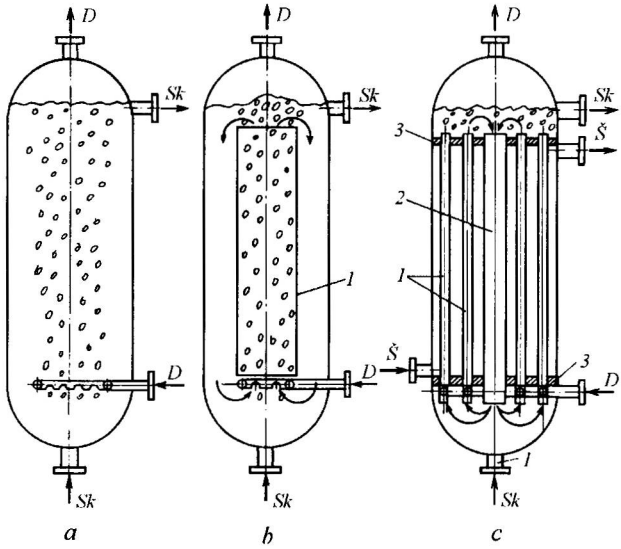
$$W = p_a \cdot V_s \cdot ln\left[\left(p_a + H \cdot \rho_{sk} \cdot g\right) / p_a\right]. \tag{7.37}$$

Oro burbuliuke esančiam skysčiui išgaravus, padidėja aukštyn kylančio oro tūris, todėl

$$W = p_a \cdot V_s \cdot ln \frac{\left(p_a - p\right) + H \cdot \rho_{sk} \cdot g}{p_a - p} \; ; \tag{7.38}$$

čia p – parcialinis skysčio garų slėgis, Pa.

Pagal (7.37) ir (7.38) lygtis galima apskaičiuoti oro pernešimo per skystį darbo sąnaudas.



7.13 pav. Pneumatinio maišymo principinės schemos:
a – su centriniu barboteriu, *b* – su dujų kėliklio (erlifto) vamzdžiu, *c* – apvalkalinis aparatas su dujų kėliklio vamzdžiais ir cirkuliaciniu vamzdžiu;
1 – dujų kėliklio vamzdžiai, *2* – cirkuliacinis vamzdis, *3* – rėtinės plokštės;
Sk – skystis, *D* – dujos, *Š* – šilumnešis

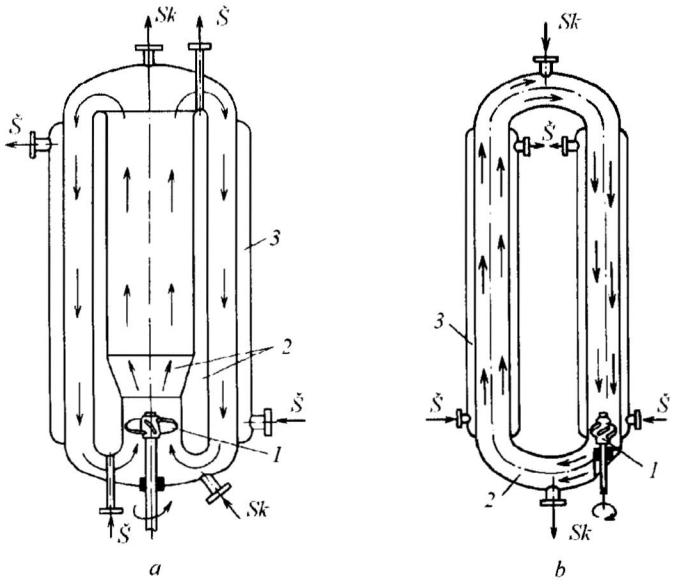
Pneumatiniam maišymui naudotini platūs, bet žemi aparatai, nes tada mažiau energijos sąnaudų reikia orui suslėgti. Maišymui oru intensyvinti aparatuose įrengiami cirkuliacijos, dujų kėliklių (erliftų) vamzdžiai, kad skystis cirkuliuotų aparate (7.13 pav.).

Kai oras tiekiamas į apatinę aparato dalį, įrengiamas erliftas (įrenginys skysčiui kelti suslėgtu oru, žr. 8 dalį), kad skystis intensyviai maišytųsi (7.13 pav., *a*). Dujų kėliklis – vamzdis atvirais abiem galais (7.13 pav., *b*) – įrengiamas aparato centre. Oras tiekiamas į cirkuliacijos vamzdžio vidų ir kuo didesnis kylantis srautas, tuo geriau susimaišo skystis.

Šilumai tiekti ir šalinti sukonstruoti vamzdiniai korpusiniai aparatai su dujų liftais (7.13 pav., *c*).

7.3. Cirkuliacinis maišymas

Chemijos pramonėje dažnai naudojami sraigtiniai maišikliai su nuvedamuoju vamzdžiu–difuzoriumi (7.14 pav., *a*). Šiuo atveju aparate sudaromas uždaras cirkuliacijos kontūras ir sraigtinis maišiklis veikia kaip siurblys. Jei aparatai turi cirkuliacijos kontūrą, cikle rezervuaras–siurblys–rezervuaras įrengiamas trijų menčių maišiklis, kurio mentelės išlenktos pagal sraigto liniją. Aparatų su cirkuliacijos kontūru hidrodinaminis skaičiavimas yra toks pat kaip ašinių siurblių.



7.14 pav. Aparatas su sraigtiniu maišikliu ir difuzoriumi (*a*):
1 – sraigtinis maišiklis, *2* – difuzorius su šilumos mainų kamera,
3 – apvalkalas; kilpinis reaktorius (*b*):
1 – sraigtinis maišiklis (ašinis siurblys), *2* – korpusas, *3* – apvalkalas;
Š – šilumnešis, *Sk* – maišomasis skystis

Cirkuliacijos kontūrui sudaryti, be aparatų su difuzoriais, naudojami vadinamieji kilpiniai reaktoriai (7.14 pav., *b*). Juos tikslinga naudoti, kai reakcijose išsiskiria daug šilumos.

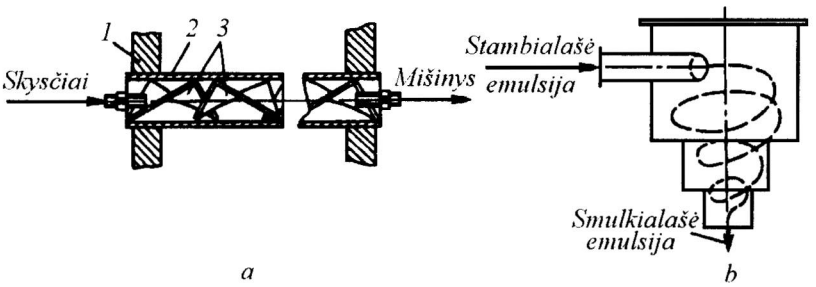
7.4. Specialieji maišymo būdai

Pramonėje dažnai naudojami specialios konstrukcijos maišymo aparatai arba įrenginiai. Prie jų priskiriami vibracinio ir pulsacinio maišymo įrenginiai.

Vibracinės maišyklės gaminamos iš metalinių strypų, prie kurių pritvirtinami slankiojantieji diskai. Pulsacines maišykles sudaro kamera su paskirstymo plokšte ir antgaliai, panardinti į aparatą. Ši kamera sujungta su pulsatoriumi – elementu, sukeliančiu dujų slėgio pulsacijas.

Skirtingos sudėties skysčio srautams maišyti pastaruoju metu pradėta naudoti statinius maišiklius – įrenginius, neturinčius judančių dalių ir įrengtus tiesiog vamzdynuose. Tokių įrenginių veikimas pagrįstas srauto energijos panaudojimu dideliems vietiniams šlyties įtempiams sudaryti. Tam tikslui maišymo sekcijoje įstatomos įvairios turbulizavimo priemonės (pvz., spiralės).

Statinių maišiklių pavyzdžiai pateikti 7.15 pav.



7.15 pav. Statinės maišyklės:
a – cilindrinė su įstatytaisiais elementais: *1* – flanšas, *2* – korpusas, *3* – maišymo elementai; b – emulsintuvas

7.15 pav., *a*, pavaizduota cilindrinės statinės skysčio ir dujų maišyklės konstrukcija. Įstatomuosius elementus sudaro skirtingai užlenktos nerūdijančiojo plieno plokštelės, įstatytos į korpusus ir nuosekliai sukabintos. Atskiras elementas apibūdinamas užsukimo kampu ir kryptimi, taip pat skersmens ir ilgio santykiu. Įstatomųjų elementų skaičius priklauso nuo klampos, taip pat nuo maišomų skysčių klampų santykio: kuo didesnė klampa ir kuo didesnis klampų skirtumas, tuo daugiau elementų reikia įstatyti.

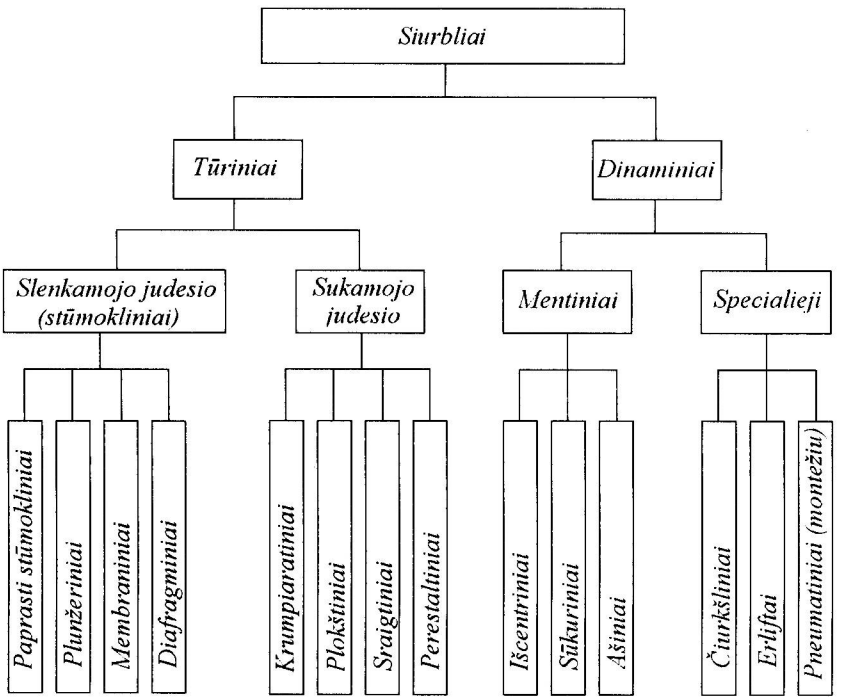
Statinės maišyklės taip pat naudojamos ruošiant emulsijas. 7.15 pav., *b*, pavaizduotas sūkurinis emulsintuvas, kuriuo ruošiami riebalų ir fosfatidų mišiniai su liesu pienu (natūralaus pieno pakaitalas). Sūkurinis emulsintuvas yra labai efektyvus, esant 0,3...0,36 MPa slėgiui; jį paprasta gaminti ir eksploatuoti. Emulsintuvas veikia išcentrinio purkštuvo principu, esant kaskadiniam skysčio tekėjimui. Gauta emulsija, turinti disperguotas iki 3 μm daleles, neišsisluoksniuoja 24 valandas.

8 dalis

SKYSČIŲ TRANSPORTAVIMAS (SIURBLIAI)

Skysčiai gali tekėti vamzdžiais ir aparatais savitaka arba priverstinai. Pirmuoju atveju skystis teka iš aukštesnio lygio į žemesnį. Skysčio lygių skirtumas turi būti toks, kad būtų nugalėtas hidraulinis pasipriešinimas vamzdžiuose ir susidarytų pakankamas tekėjimo greitis. Savitaka tekančio skysčio potencinė energija mažėja.

Siurblių klasifikacijos schema



Priverstiniam skysčių transportavimui naudojami siurbliai, t. y. aparatai, kurie iš variklio gautą mechaninę energiją paverčia skysčio tėkmės energija. Siurblius galima klasifikuoti pagal veikimo principą ir konstrukciją. Chemijos pramonėje dažniausiai naudojamų siurblių klasifikacija pateikta schemoje.

Tūriniuose siurbliuose skysčio energija ir slėgis didėja, kai pirmyn ir atgal slankiojantis arba besisukantis siurblio elementas iš uždaros erdvės išstumia tam tikrą skysčio tūrį. Pagal darbo detalių judėjimo formą tūriniai siurbliai skirstomi į turinčius pirmyn ir atgal judančius darbo elementus (stūmokliniai, plunžeriniai, diafragminiai) ir besisukančius arba rotorinius (krumpliaratiniai, sraigtiniai ir kt.). Juose skysčiui suteikiama potencinė energija.

Dinaminiuose siurbliuose skysčio energija ir slėgis didėja, jį veikiant išcentrinėms jėgoms (pvz., išcentriniuose ir ašiniuose siurbliuose) arba trinties jėgoms (pvz., čiurkšliniuose ir sūkuriniuose siurbliuose). Todėl pagal skystį veikiančių jėgų pobūdį dinaminiai siurbliai skirstomi į mentinius ir trinties siurblius. Dinaminiuose siurbliuose didinama skysčių kinetinė energija.

Dažniausiai pramonėje naudojami išcentriniai ir ašiniai siurbliai.

8.1. Pagrindiniai siurblių parametrai

Pagrindiniai siurblių parametrai yra našumas V_s, slėgio aukštis H, galia N ir naudingumo koeficientas η.

Siurblio našumu vadinamas skysčio, kurį siurblys transportuoja į slėgimo vamzdį, debitas V_s. Teoriniu siurblio našumu vadinamas iš rezervuaro siurbiamo skysčio debitas V_t. Siurbliuose dalis skysčio nuteka pro riebokšlius, įvairius tarpiklius, vožtuvus, plyšius tarp rotoriaus menčių ir siurblio korpuso. Šie debito nuostoliai siurblyje apibūdinami tūrio naudingumo koeficientu η_t:

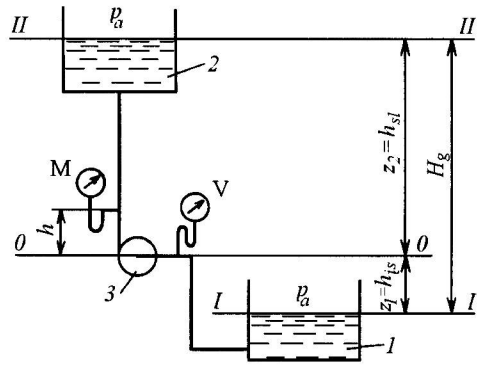
$$\eta_t = \frac{V_s}{V_t}. \qquad (8.1)$$

Siurblio sudaromo slėgio aukštis H nusako savitąją perteklinę energiją, kurią siurblys suteikia vienam kilogramui transportuojamojo skysčio. Taigi slėgio aukštis nepriklauso nuo skysčio tankio, bet priklauso nuo siurblio galios. Parenkant siurblius, *sudaromo slėgio aukštis H* apskaičiuojamas pagal Bernulio lygtį. Panagrinėsime į hidraulinę sistemą įjungto siurblio schemą (8.1 pav.). Joje kaip atskaitos plokštuma pasirenkama plokštuma *0–0*, einanti per siurblio ašį.

Užrašysime pjūvių *I–I* ir *0–0* (įsiurbimo linijos) Bernulio lygtį:

$$-z_1 + p_1/(\rho \cdot g) + w_1^2/(2 \cdot g) = z_0 + p_{is}/(\rho \cdot g) + w_{is}^2/(2g) + h_{n.is}; \quad (8.2)$$

čia p_{is} – slėgis siurblio įsiurbimo linijoje, Pa; p_1 – slėgis skerspjūvyje *I–I*, Pa; w_1 ir w_{is} – skysčio judėjimo greitis rezervuaro *1* skerspjūvyje *I–I* ir siurblio įsiurbimo linijoje, m/s; $h_{n.is}$ – slėgio aukščio nuostoliai įsiurbimo linijoje, m.



8.1 pav. Į hidraulinę sistemą įjungto siurblio schema:
1, *2* – rezervuarai, *3* – siurblys; *M* – manometras, *V* – vakuummetras

Kadangi $z_1 = h_{is}$, $w_1 \approx 0$, $z_0 = 0$, $p_1 = p_a$ (čia p_a – atmosferos slėgis), tai (8.1) lygtį galima užrašyti taip:

$$p_a/(\rho \cdot g) - p_{is}/(\rho \cdot g) = w_{is}^2/(2 \cdot g) + h_{is} + h_{n.is}. \qquad (8.2a)$$

Pjūvių *0–0* ir *II–II* (slėgimo linijos) Bernulio lygtis:

$$z_0 + p_{sl}/(\rho \cdot g) + w_{sl}^2/(2 \cdot g) = z_2 + p_2/(\rho \cdot g) + w_2^2/(2 \cdot g) + h_{n.sl}; \qquad (8.3)$$

čia w_{sl} – skysčio srauto greitis siurblio slėgimo linijoje, m/s; w_2 – skysčio srauto greitis rezervuaro *2* skerspjūvyje *II–II*, m/s; p_{sl} – slėgis siurblio slėgimo linijoje, Pa; p_1 – slėgis skerspjūvyje *II–II*, Pa; $h_{n.sl}$ – slėgio aukščio nuostoliai siurblio slėgimo linijoje, m.

Kadangi $z_0 = 0$, $z_2 = h_{sl}$, $p_2 = p_a$, $w_2 \approx 0$, (8.3) lygtį užrašome taip:

$$p_{sl}/(\rho \cdot g) - p_a/(\rho \cdot g) = h_{sl} - w_{sl}^2/(2 \cdot g) + h_{n.sl}. \qquad (8.3a)$$

Siurblio sudaromo slėgio aukštis H apskaičiuojamas kaip slėgio aukščių įsiurbimo ir slėgimo linijose suma:

$$\begin{aligned} H &= p_{sl}/(\rho \cdot g) - p_{is}/(\rho \cdot g) = \Delta p/(\rho \cdot g) = \\ &= \left(w_l^2 - w_s^2\right)/(2 \cdot g) + h_l + h_s + h_{n.is} + h_{n.sl} = \\ &= \left(w_{is}^2 - w_{sl}^2\right)/(2 \cdot g) + H_g + h_n; \end{aligned} \qquad (8.4)$$

čia $H_g = h_l + h_s$ – geometrinis skysčio pakėlimo aukštis, m; $h_n = h_{n.l} + h_{n.s}$ – bendri slėgio aukščio nuostoliai vamzdynuose, m.

Kai $p_1 \neq p_a$ ir $p_2 \neq p_a$, (8.4) lygtis užrašoma taip:

$$H = H_g + (p_2 - p_1)/(\rho \cdot g) + (w_{is}^2 - w_{sl}^2)/(2 \cdot g) + h_n. \qquad (8.4a)$$

Jeigu įsiurbimo ir slėgimo vamzdžių skersmuo yra vienodas (realiuose procesuose tai būna dažnai), (8.3a) lygtis tampa dar paprastesnė:

$$H = H_g + (p_2 - p_1)/(\rho \cdot g) + h_n. \qquad (8.4b)$$

Iš (8.4) lygties matyti, kad skysčio pakėlimo aukštis gali būti apibūdintas kaip aukštis, į kurį siurblio suteikta energija galima pakelti 1 kg transportuojamojo skysčio. Todėl siurblio sudaromo slėgio aukštis nepriklauso nuo transportuojamojo skysčio tankio.

Veikiančių siurblių sudaromo slėgio aukštis nustatomas pagal manometro ir vakuummetro, įrengtų atitinkamai įsiurbimo ir slėgimo linijose, rodmenis p_M ir p_V. Atsižvelgiant į tai, kad $p_{sl} = p_M + p_a$ ir $p_{is} = p_a - p_V$, gaunama:

$$H = (p_M + p_V)/(\rho \cdot g) + h; \qquad (8.5)$$

čia h – vertikalusis atstumas tarp manometro ir vakuummetro įtvirtinimo taškų, m. Kadangi h vertė, palyginti su sudaromo slėgio aukščiu, yra nedidelė, jos galima nepaisyti.

Naudojantis (8.2a) lygtimi, galima nustatyti siurblio siurbimo aukštį, t. y. vertikalųjį atstumą tarp siurbiamo skysčio paviršiaus ir siurblio ašies. Siurbiama išoriniam (dažniausiai atmosferos) slėgiui veikiant rinkimo rezervuare esančio skysčio paviršių (8.1 pav., 1 poz.) ir slėgiui siurbimo vamzdyje veikiant srautą, įtekantį į siurblį, $p_a - p_{is}$.

Kad siurblys siurbtų, p_{is} turi būti didesnis už siurbiamo skysčio sočiųjų garų slėgį $p_{soč}$ tam tikroje temperatūroje, t. y. $p_{is} > p_{soč}$, kitaip transportuojamasis skystis intensyviai garuos ir iš jo kartu skirsis ištirpusios dujos. Tai labai sumažins siurbimo aukštį arba skystis visai nustos tekėti į siurblį, t. y. įsiurbimo aukštis sumažės iki nulio.

Iš (8.2a) lygties gausime:

$$p_{is}/(\rho \cdot g) = p_a/(\rho \cdot g) - \left[w_{is}^2/(2 \cdot g) + h_{is} + h_{n.is}\right] \geq p_{soč}/(\rho \cdot g). \qquad (8.5a)$$

Iš čia pasiekiamas įsiurbimo aukštis h_{is}, m:

$$h_{is} \leq p_a/(\rho \cdot g) - \left[p_{soč}/(\rho \cdot g) + w_{is}^2/(2 \cdot g) + h_{n.is}\right]. \qquad (8.5b)$$

Iš (8.5b) lygties matyti, kad siurbimo aukštis mažėja, mažėjant atmosferos slėgiui ir didėjant sočiųjų garų slėgiui (t. y. ir temperatūrai), taip pat skysčio judėjimo greičiui ir slėgio aukščio nuostoliams siurbimo vamzdyje.

Siurbimo aukštis, siurbiant skystį iš atvirų rezervuarų, negali viršyti atmosferos slėgį atitinkančio skysčio stulpo aukščio. Pvz., jūros lygyje 20 °C temperatūros vandens siurbimo aukštis negali būti didesnis kaip 10 m. Paprastai aplinkos temperatūros skysčių siurbimo aukštis nebūna didesnis kaip 5...6 m. Transportuojant karštus skysčius, $h_{įs}$ daug mažesnis. Todėl karšti ir labai klampūs skysčiai dėl didelio hidraulinio pasipriešinimo į siurblį tiekiami tam tikru pertekliniu slėgiu arba prie tiriamojo siurblio įsiurbimo linijos prijungiamas papildomas siurblys.

Siurbimo vamzdyje smarkiai sumažėjus absoliučiajam slėgiui p_s, transportuojamasis skystis pradeda intensyviai garuoti ir jame atsiranda garų burbuliukų. Šie burbuliukai jungiasi, todėl kartais susidaro nemažos garų pripildytos ertmės. Patekus tokiam skysčiui į siurblio slėgimo zoną, garai staigiai kondensuojasi. Skystis susidariusį vakuumą užpildo dideliu greičiu, ir tai sukelia hidraulinius smūgius. Toks reiškinys vadinamas *kavitacija* (lot. *cavitas* – tuštuma). Ji labai kenksminga, nes ardo siurblio judamąsias dalis ir patį korpusą. Be to, kavitacijos metu labai sumažėja siurblio našumas ir siurblio sudaromo slėgio aukštis.

Kavitacijos dažniausiai išvengiama taip: 1) parenkamas toks siurbimo aukštis H, kad slėgis $p_{įs}$ būtų didesnis už transportuojamojo skysčio sočiųjų garų slėgį $p_{soč}$; 2) sutrumpinamas siurbimo vamzdis ir padidinamas jo skersmuo, kad sumažėtų hidrauliniai aukščio nuostoliai h_n.

(8.5b) priklausomybė galioja įvairių konstrukcijų siurbliams, nors patys siurbimo procesai juose skiriasi. Todėl skaičiuojant siurbimo aukštį pagal (8.5b) lygtį, daromos tam tikros pataisos. Pvz., skaičiuojant stūmoklinių siurblių siurbimo aukštį $h_{n.įs}$, daroma pataisa, įvertinanti inercinius nuostolius ir t. t.

Siurblio atiduodama skysčiui galia N_s vadinama naudingąja galia. Ji priklauso nuo siurblio našumo V, sudaromo slėgio aukščio H ir transportuojamojo skysčio tankio ρ:

$$N_s = V_s \cdot \rho \cdot g \cdot H = V_s \cdot \Delta p\,; \qquad (8.6)$$

čia N_s – siurblio naudingoji galia, W; V_s – siurblio našumas, m^3/s; ρ – skysčio tankis, kg/m^3; H – siurblio sudaromo slėgio aukštis, m; $\rho \cdot g \cdot H = \Delta p$ – siurblio sudaromas slėgis, Pa.

Siurblio gaunama iš variklio galia (veleno galia) N_{vel} turi būti didesnė už siurblio atiduodamą skysčiui galią, nes dalis jos sunaudojama pasipriešinimams nugalėti:

$$N_{vel} = \frac{V_s \cdot \rho \cdot g \cdot H}{1000 \cdot \eta}\,; \qquad (8.7)$$

čia N_{vel} – siurblio veleno galia, kW; η – siurblio naudingumo koeficientas.

Siurblio naudingumo koeficientas η įvertina energijos nuostolius, kurie susidaro darbo metu:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_h \cdot \eta_m ; \qquad (8.8)$$

čia η_t – tūrio naudingumo koeficientas; η_h – hidraulinis naudingumo koeficientas, kuriuo įvertinami nuostoliai hidrauliniams pasipriešinimams siurblyje nugalėti; η_m – mechaninis naudingumo koeficientas, kuriuo įvertinami energijos nuostoliai, susidarantys dėl trinties guoliuose ir riebokšliuose.

Siurblio naudingumo koeficientas η priklauso nuo siurblio tipo, konstrukcijos, našumo, slėgio aukščio ir išsidėvėjimo laipsnio. Pvz., daugelio stūmoklinių siurblių $\eta = 0,8...0,9$, išcentrinių $\eta = 0,6...0,95$.

Siurblio variklio galia arba nominalioji variklio galia N_v turi būti didesnė už siurblio veleno galią N_{vel}, nes reikia nugalėti pasipriešinimus pavaroje ir pačiame variklyje:

$$N_v = k \cdot \frac{N_{vel}}{\eta_p \cdot \eta_v} ; \qquad (8.9)$$

čia η_p – pavaros naudingumo koeficientas; η_v – variklio naudingumo koeficientas; k – elektros variklio galios atsargos koeficientas, kuris priklauso nuo variklio galios.

Variklio galia, kW	1	1...5	5...50	50...100	100
Atsargos koeficientas k	2...1,5	1,5...1,25	1,25...1,15	1,15...1,08	1,05

8.2. Tūriniai siurbliai

8.2.1. Stūmokliniai siurbliai

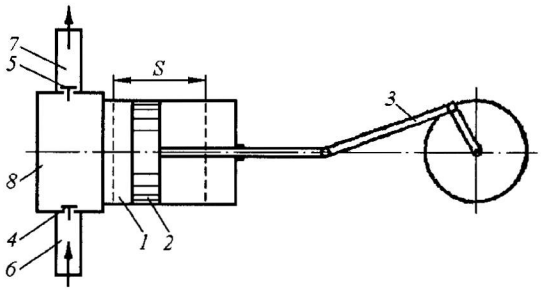
Stūmokliniai siurbliai priklauso tūrinių siurblių grupei, nes, stūmokliui slenkant viena kryptimi, tam tikras skysčio kiekis (tūris) įsiurbiamas į darbo kamerą ir cilindrą, o slenkant priešinga kryptimi – išstumiamas.

Stūmokliniai siurbliai pagal konstrukciją skirstomi į paprastuosius, plunžerinius, specialiuosius – membraninius ir diafragminius; pagal veikimo pobūdį – į viengubuosius, dvigubuosius, trigubuosius, keturgubuosius ir diferencinius; pagal cilindro ašies padėtį – į horizontaliuosius ir vertikaliuosius.

Viengubuoju horizontaliuoju paprastuoju stūmokliniu siurbliu (8.2 pav.) transportuojami mechaninių priemaišų neturintys skysčiai. Įjungtas siurblio variklis per švaistiklinį mechanizmą *3* (iš kairės kraštinės padėties) traukia stūmoklį *2* į dešinę. Tuo metu cilindre *1* susidaro vakuumas.

Skystis, slegiamas atmosferos slėgio, kuris yra didesnis už slėgį cilindre, kyla siurbimo vamzdžiu *6* aukštyn ir per siurbimo vožtuvą 4 pripildo darbo kamerą ir cilindrą *1*. Slėgimo linijos vožtuvas *5* tuo metu yra uždarytas, nes jį

slegia slėgimo vamzdyje esantis skystis. Stūmokliui judant iš dešinės kraštinės padėties atgal į kairę, dėl cilindre susidariusio perteklinio slėgio siurbimo vožtuvas užsidaro, o slėgimo linijos vožtuvas atsidaro ir skystis, slegiamas stūmoklio, pro atsidariusį slėgimo vožtuvą *5* išteka į slėgimo vamzdį *7*. Toliau procesas kartojasi.



8.2 pav. Paprastojo horizontaliojo stūmoklinio siurblio schema: *1* – cilindras, *2* – stūmoklis (*S* – stūmoklio eiga), *3* – alkūninis mechanizmas, *4* – siurbimo linijos vožtuvas, *5* – slėgimo linijos vožtuvas, *6* – įsiurbimo vamzdis, *7* – slėgimo vamzdis, *8* – darbo kamera

Alkūniniam velenui apsisukus vieną kartą (cilindras padaro dvi eigas – vieną iš kairės į dešinę ir vieną iš dešinės į kairę), t. y. vieną kartą įsiurbiamas ir išstumiamas toks skysčio tūris V, m^3:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S = F \cdot S . \qquad (8.10)$$

Teorinis siurblio našumas V_t, m^3/s, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$V_t = F \cdot S \cdot n ; \qquad (8.11)$$

čia V – išstumto skysčio tūris, m^3; V_t – teorinis siurblio našumas, m^3/s; D – stūmoklio skersmuo, m; F – stūmoklio plotas, m^2; S – stūmoklio eiga, m; n – alkūninio veleno sukimosi dažnis, s^{-1}.

Tokiu paprastuoju siurbliu skystis transportuojamas netolygiai.

Dėl transportuojamojo skysčio nuostolių tikrasis stūmoklinio siurblio našumas yra mažesnis už teorinį. Skysčio nuostolių susidaro dėl: a) pavėluoto vožtuvo atidarymo arba uždarymo; b) riebokšlių, sujungimų ir kitų vietų nesandarumo; c) oro, kuris patenka į siurblį kartu su skysčiu. Visi šie nuostoliai įvertinami tūrio naudingumo koeficientu.

Tikrasis siurblio našumas apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

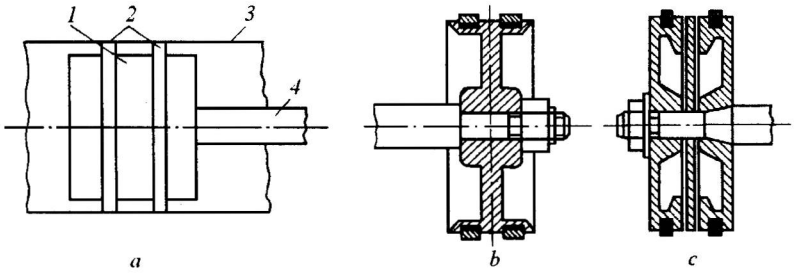
$$V_f = F \cdot S \cdot n \cdot \eta_t \,. \qquad (8.12)$$

Tūrio naudingumo koeficiento η_t dydis priklauso ir nuo stūmoklio skersmens. Transportuojant klampesnius skysčius, tūrio naudingumo koeficientas mažėja. Lentelėje pateikiamos šalto vandens η_t vertės.

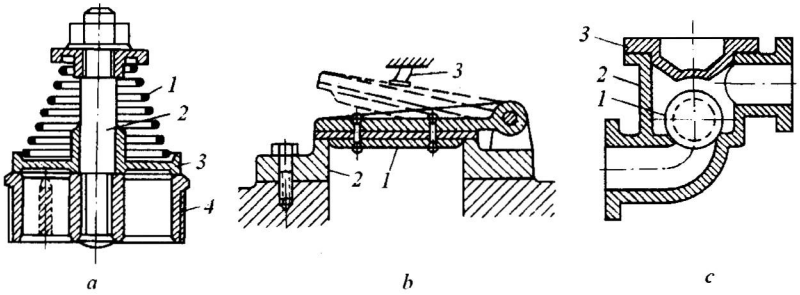
Stūmoklio skersmuo, cm	< 5	5...15	> 15
Tūrio naudingumo koeficientas	0,85...0,96	0,9...0,95	0,97...0,99

Pagal įsiurbimų ir suslėgimų skaičių, velenui apsisukus vieną kartą arba stūmokliui du kartus nuėjus kelią S, stūmokliniai siurbliai būna vienkartiniai ir daugkartiniai (8.2 pav.). Pastarieji skystį tiekia tolygiau ir yra našesni.

8.3 pav. pavaizduotos kai kurios stūmoklių, o 8.4 pav. – stūmoklinių siurblių vožtuvų konstrukcijos.



8.3 pav. Paprastojo stūmoklio (*a*) ir palengvintų vientisųjų (*b*) bei surenkamųjų (c) diskinių stūmoklių konstrukcijos:
1 – stūmoklis, *2* – keičiami sandarinimo žiedai, *3* – cilindras, *4* – kotas

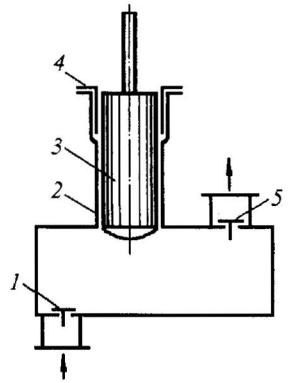


8.4 pav. Stūmoklinių siurblių vožtuvai:
a – lėkštinis (*1* – spyruoklė, *2* – strypelis, *3* – lėkštė, *4* – balnas),
b – atlošiamasis (*1* – dangtelis, *2* – antgalis, *3* – pakilimo ribotuvas),
c – rutulinis (*1* – vožtuvas, *2* – korpusas, *3* – dangtelis)

Pagal stūmoklio padėtį skiriami horizontalieji ir vertikalieji stūmokliniai siurbliai. Dėl netolygaus slėgio stūmoklio cilindre (cilindrui judant apatinė jo dalis yra veikiama stūmoklio sunkio jėgos) horizontaliųjų siurblių cilindras ir stūmoklis išsidėvi nevienodai ir greičiau negu vertikaliųjų siurblių, t. y. vertikalieji siurbliai laiko ilgiau.

Norint stūmokliniais siurbliais pasiekti didelius slėgius, reikia naudoti sudėtingų konstrukcijų sandarinimo priemones (cilindrų žiedus, elastingus manžetus), o cilindrų ir stūmoklių paviršius turi būti apdorotas labai tiksliai. Tokių siurblių stūmoklis keičiamas tuščiaviduriu arba vientisuoju plunžeriu. Todėl stūmokliniai siurbliai pagal cilindro konstrukciją skirstomi į stūmoklinius ir plunžerinius.

Vertikalusis plunžerinis siurblys (8.5 pav.) veikia tokiu pat principu kaip ir paprastasis, tik vietoj stūmoklio yra įtaisytas plunžeris *3*. Nuo paprastojo stūmoklio plunžeris skiriasi tuo, kad jo ilgis didesnis už skersmenį. Plunžeris gali būti ne taip tiksliai prišlifuotas prie cilindro *2* sienelių, nes jis sandarinamas riebokšliu *4*.



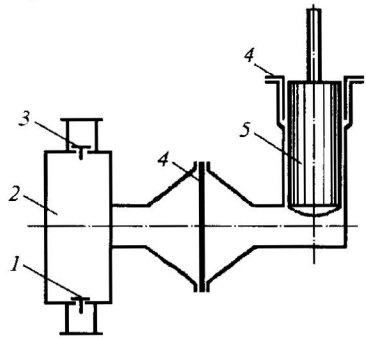
8.5 pav. Vertikaliojo plunžerinio siurblio schema:
1 – siurbimo linijos vožtuvas,
2 – cilindras, *3* – plunžeris, *4* – riebokšlis, *5* – slėgimo linijos vožtuvas

Plunžeriniai siurbliai sudaro didesnį slėgį negu paprastieji stūmokliniai siurbliai, todėl jais transportuojami klampesni skysčiai.

Pagal skriejiko veleno sukimosi dažnį stūmokliniai siurbliai skirstomi į lėtaeigius (40...60 aps./min), normaliuosius (60...120 aps./min) ir greitaeigius (120 ir daugiau kaip 180 aps./min).

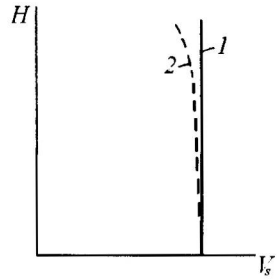
Atskira paprastojo plunžerinio siurblio rūšis yra membraniniai (8.6 pav.) ir diafragminiai (8.8 pav.) siurbliai, kurie naudojami užterštiems ir chemiškai agresyviems skysčiams transportuoti.

Membraniniai siurbliai (8.6 pav.) pagal veikimo principą priskiriami prie stūmoklinių siurblių.



8.6 pav. Membraninio siurblio schema:
1 – siurbimo linijos vožtuvas, *2* – darbo kamera, *3* – slėgimo linijos vožtuvas, *4* – membrana, *5* – plunžeris

Nuo paprastųjų stūmoklinių siurblių jie skiriasi tuo, kad plunžerį (stūmoklį) *5* nuo transportuojamojo skysčio skiria elastinga gumos arba specialaus plieno membrana *4*. Kylant plunžeriui *5* į viršų, mažėja slėgis membranos *4* dešinėje pusėje ir ji išlinksta. Tuo metu skystis siurbiamas į darbo kamerą *2*. Plunžeriui leidžiantis žemyn, membrana išlinksta į priešingą pusę ir pro vožtuvą *3* išstumia skystį iš darbo kameros *2*.



8.7 pav. Stūmoklinio siurblio charakteristika $H = f(V_s)$:
1 – teorinė kreivė ($V_s = const$), *2* – darbinė kreivė

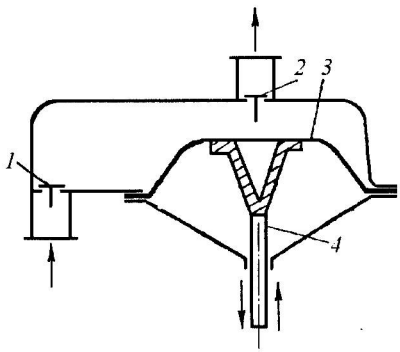
Priklausomybė tarp siurblio sudaromo slėgio aukščio H ir našumo V_s, kai $n = const$, vadinama stūmoklinio siurblio darbo charakteristika. Jos grafinis vaizdas yra vertikali tiesė, o tai rodo, kad stūmoklinio siurblio našumas nepriklauso nuo sudaromo slėgio aukščio. Tačiau dėl skysčio nuostolių pro įvairius nesandarumus tikroji dirbančio siurblio charakteristika nesutampa su teorine (8.7 pav.).

Skaičiuojant stūmoklinio siurblio įsiurbimo aukštį, į (8.5b) lygtį reikia įrašyti papildomą slėgio aukštį Δh_{in} inercijos jėgai įveikti:

$$\Delta h_{in} = \frac{6}{S} \cdot \frac{h_{5s}}{g} \cdot \frac{f}{f_1} \cdot \frac{u^2}{r}; \qquad (8.13)$$

čia $h_{įs}$ – įsiurbimo vamzdyje esančio skysčio stulpo aukštis, m; f ir f_1 – stūmoklio ir įsiurbimo vamzdžio skerspjūvio plotas, m^2; u – smagračio sukimosi apskritiminis greitis, m/s; r – smagračio spindulys, m.

Diafragminiai siurbliai (8.8 pav.) nuo membraninių siurblių skiriasi tuo, kad neturi stūmoklio. Leidžiant žemyn lanksčią diafragmą 3, pro vožtuvą 1 skystis įsiurbiamas į darbo kamerą, o keliant ją į viršų, pro vožtuvą *2* skystis išstumiamas.



8.8 pav. Diafragminio siurblio schema: *1* – siurbimo linijos vožtuvas, *2* – slėgimo linijos vožtuvas, *3* – diafragma, *4* – diafragmą kilnojantis strypas

Stūmoklinių siurblių darbo netolygumai ir būdai jiems sumažinti. Didelis paprastųjų stūmoklinių siurblių trūkumas yra jų darbo netolygumas. Teoriškai tiriant alkūninio mechanizmo darbą, nustatyta, kad siurblio stūmoklio greitis kinta pagal sinusoidę. Analogiškai pagal sinusoidę keičiasi ir siurblio išstumiamo skysčio tūris (8.9 pav., *a*). Darbo netolygumus galima sumažinti naudojant dvigubuosius ar trigubuosius ir diferencinius siurblius arba oro gaubtus.

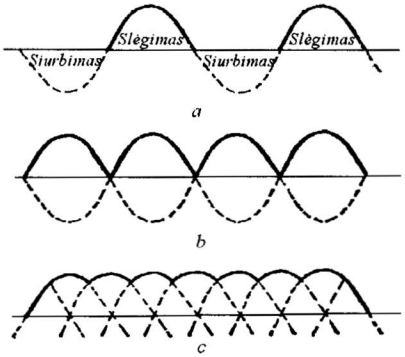
Dvigubieji stūmokliniai siurbliai (8.10 pav.) dirba tolygiau negu viengubieji, be to, yra beveik dvigubai už juos našesni (8.9 pav., *b*). Šie siurbliai turi dvi darbo kameras.

Stūmokliui *3* judant į dešinę, į kairiąją darbo kamerą *1* siurbiamas skystis. Tuo metu iš dešiniosios darbo kameros *2* stūmoklis išstumia skystį. Apskaičiuojant siurblio našumą, reikia atsižvelgti į tai, kad iš dešiniosios darbo kameros skysčio išstumiama mažiau, negu jo įsiurbiama į kairiąją kamerą, nes dalį dešiniosios kameros užima stūmoklio kotas *4*.

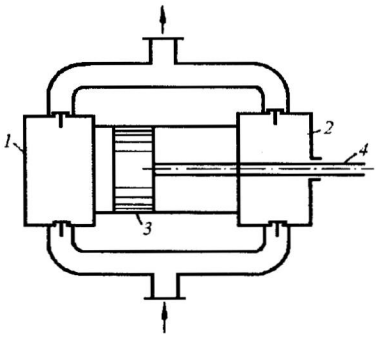
Tikrasis dvigubojo siurblio našumas yra toks:

$$V_s = (2F - f) \cdot S \cdot n \cdot \eta_t; \qquad (8.14)$$

čia V_s – našumas, m^3/s; F – stūmoklio plotas, m^2; f – stūmoklio koto skerspjūvio plotas, m^2; S – stūmoklio eiga, m; n – alkūninio veleno sukimosi dažnis, s^{-1}; η_t – tūrio naudingumo koeficientas.

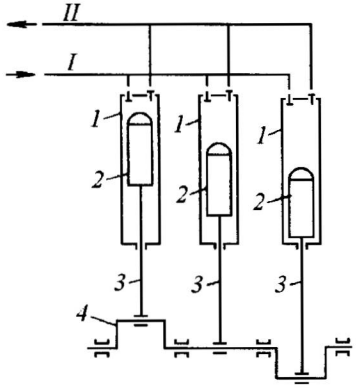


8.9 pav. Viengubojo (*a*), dvigubojo (*b*) ir trigubojo (*c*) stūmoklinių siurblių darbo diagramos



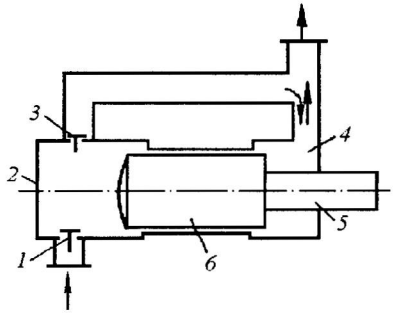
8.10 pav. Dvigubojo stūmoklinio siurblio schema: *1* – kairioji darbo kamera, *2* – dešinioji darbo kamera, *3* – stūmoklis, *4* – stūmoklio kotas

Trigubasis stūmoklinis siurblys (8.11 pav.) dirba dar tolygiau už dvigubąjį siurblį (8.9 pav., *c*). Kampai tarp alkūnių, prie kurių pritvirtinti švaistikliai, yra 120°. Tokio siurblio našumas yra beveik trigubai didesnis už paprastojo viengubojo siurblio našumą.

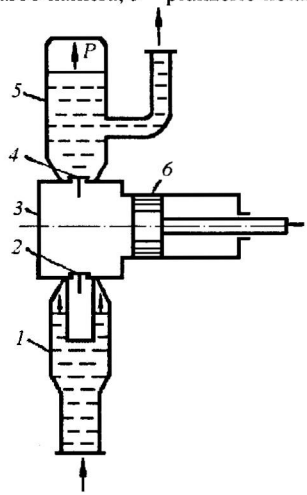


8.11 pav. Trigubojo plunžerinio siurblio schema: *1* – cilindrai, *2* – plunžeriai, *3* – švaistikliai, *4* – alkūninis velenas; *I* – įsiurbimo, *II* – slėgimo linija

Diferencinis stūmoklinis siurblys (8.12 pav.) nuo viengubojo plunžerinio siurblio skiriasi tuo, kad turi papildomą darbo kamerą *4*, tik be vožtuvų. Plunžerio *6* skerspjūvio plotas yra du kartus didesnis už plunžerio koto *5* skerspjūvio plotą. Pusė skysčio, kurį plunžeris stumia iš pagrindinės kameros *2*, nuteka į papildomą kamerą *4*. Plunžeriui *6* slenkant į dešinę, skystis siurbiamas į pagrindinę darbo kamerą *2* ir tuo pat metu išstumiamas skystis iš papildomos kameros į slėgimo vamzdį. Tokio tipo siurblio našumas toks pat kaip viengubojo siurblio, bet jis dirba daug tolygiau.



8.12 pav. Diferencinio stūmoklinio siurblio schema: *1* – siurbimo linijos vožtuvas, *2* – pagrindinė darbo kamera, *3* – slėgimo linijos vožtuvas, *4* – papildoma darbo kamera, *5* – plunžerio kotas, *6* – plunžeris



8.13 pav. Stūmoklinio siurblio su oro gaubtais schema: *1* – siurbimo vamzdžio oro gaubtas, *2* – siurbimo linijos vožtuvas, *3* – darbo kamera, *4* – slėgimo linijos vožtuvas, *5* – slėgimo vamzdžio oro gaubtas, *6* – stūmoklis

Vienguboji stūmokliniai siurbliai dirba tolygiau, kai prie jų siurbimo ir slėgimo vamzdžių prijungiami *oro gaubtai* (8.13 pav.). Oro gaubtas – tai tarpinis indas, kurio nuo 1/2 iki 1/3 tūrio pripildyta oro. Prieš paleidžiant siurblį, siurbimo vamzdis ir dalis siurbimo vamzdžio oro gaubto *1* pripildoma transportuojamojo skysčio. Į darbo kamerą *3* skystis siurbiamas ne iš siurbimo vamzdžio, o iš jo oro gaubto. Iš darbo kameros išstumiamo skysčio dalis kaupiasi gaubte *5* ir slegia jame esantį orą. Per įsiurbimo taktą, kai skystis į slėgimo vamzdį iš darbo kameros neina, suslėgtas gaubte oras išspaudžia į slėgimo liniją skysčio perteklių. Kuo didesni oro gaubtai, tuo tolygiau transportuojamas skystis.

Stūmoklinio siurblio paleidimo tvarka:

1) prieš įjungiant variklį, siurblys atidžiai apžiūrimas ir patikrinamas tepalo kiekis tepalinėse;
2) atidaromas slėgimo linijos čiaupas. Jeigu yra įrengta grįžtamojo debito reguliavimo linija, tai atidaromas ir jos čiaupas;
3) atidarius specialų oro išleidimo čiaupą, siurblys pripildomas transportuojamojo skysčio;
4) įjungiamas siurblio variklis ir, nusistovėjus sukimosi dažniui, iš lėto užsukant grįžtamosios linijos čiaupą, nustatomas reikalingas debitas.

Dirbant siurbliui, reikia stebėti, ką rodo manometras ir vakuummetras, ir tikrinti guolių tepimą.

Stūmoklinio siurblio našumą taip pat galima keisti keičiant alkūninio veleno sukimosi dažnį arba stūmoklio eigą.

Kadangi stūmoklinio siurblio našumas nepriklauso nuo sudaromo slėgio (8.8 pav.), todėl našumo negalima pakeisti pridarant slėgimo linijos čiaupą. Jį uždarius, gali įvykti avarija.

Stūmoklinio siurblio stabdymo tvarka:

1) išjungiamas variklis;
2) uždaromas slėgimo linijos čiaupas;
3) jeigu stabdoma ilgesniam laikui, tai iš siurblio išleidžiamas skystis.

8.2.2. Krumpliaratiniai siurbliai

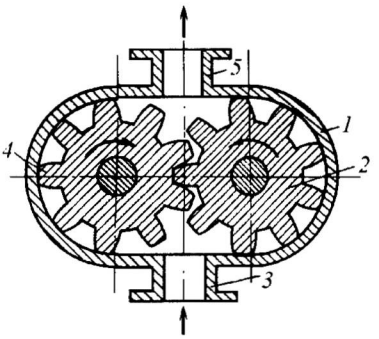
Krumpliaratiniais siurbliais dažniausiai transportuojami švarūs ir klampūs skysčiai. Krumpliaratinio siurblio (8.14 pav.) korpuse *1* įtaisyti du krumpliaračiai *2, 4*, kurių vieną suka variklis, o kitą – pirmasis krumpliaratis. Skystis, patekęs į ertmę tarp besisukančių krumpliaračių krumplių, korpuso pasieniu iš siurbimo kameros *3* varomas į slėgimo kamerą *5*.

Krumpliaratinių siurblių našumas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$V_s = 2 \cdot m \cdot z \cdot n \cdot \eta_t; \qquad (8.14)$$

čia V_s – siurblio našumas, m^3/s; m – tūris tarp dviejų krumplių, m^3; z – vieno krumpliaračio krumplių skaičius; n – krumpliaračių sukimosi dažnis, s^{-1}; η_t – tūrio naudingumo koeficientas (0,7...0,9).

Krumpliaratiniams siurbliams pakeitus sukimosi kryptį, pasikeičia skysčio tekėjimo kryptis. Krumpliaratinių siurblių naudingumo koeficientas η_v įvertina dalinį skysčio grąžinimą į įsiurbimo kamerą, taip pat skysčio pratekėjimą pro tarpus ir būna lygus 0,7...0,9.

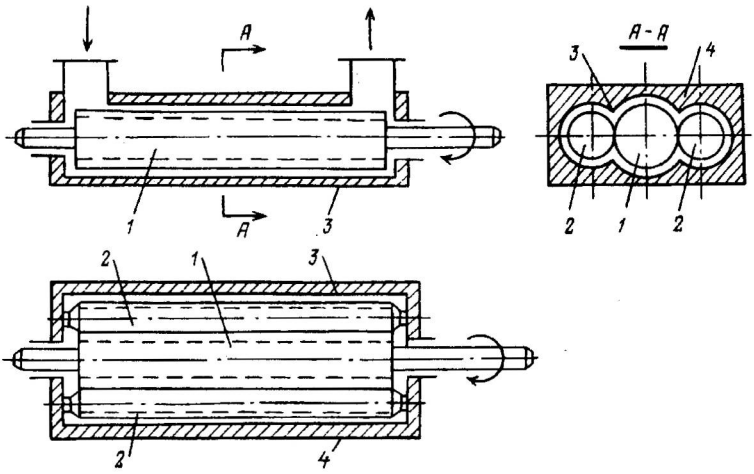


8.14 pav. Krumpliaratinis siurblys: *1* – korpusas, *2, 4* – krumpliaračiai, *3* – siurbimo kamera, *5* – slėgimo kamera

Krumpliaratiniai siurbliai dažniausiai naudojami klampiems skysčiams transportuoti uždaroje sistemoje (recirkuliacijai).

8.2.3. Sraigtiniai siurbliai

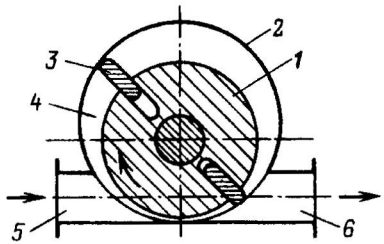
Šie siurbliai (8.15 pav.) turi varantįjį *1* ir kelis varomuosius *2* sraigtus, išdėstytus korpuse *4* esančiame apgaube *3*. Sraigtai turi specialų profilį – tokį, kad jų sukibimo linija visiškai hermetizuotų slėgimo ir įsiurbimo sritis. Varomųjų ir varančiojo sraigtų sriegio linija yra priešingų krypčių. Pramonėje dažniausiai naudojami trijų sraigtų siurbliai. Vidurinis sraigtas yra varantysis, o šoniniai – varomieji. Sraigtai įtaisyti cilindro formos apgaube su glotniu paviršiumi. Sraigtams sukantis, sriegio įdubas užpildantis skystis juda išilgai siurblio ašies ir yra tiekiamas į slėgimo vamzdį. Sraigtinių siurblių sudaromo slėgio aukštis priklauso nuo sraigtų žingsnių skaičiaus ir didėja, didėjant sraigtų ilgio ir skersmens santykiui. Šių siurblių našumas didėja, didėjant sraigtų sukimosi dažniui, nors slėgio aukštis lieka pastovus.



8.15 pav. Sraigtinis siurblys:
1 – varantysis sraigtas, *2* – varomieji sraigtai, *3* – sraigtų apgauba, *4* – korpusas

8.2.4. Plokštiniai rotaciniai siurbliai

Į tokio siurblio rotoriaus *1* (8.16 pav.) spindulines išpjovas įstatomos plokštelės *3*. Rotorius įmontuotas į siurblio korpusą *2* ekscentriškai.



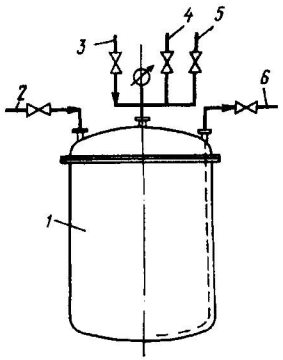
8.16 pav. Plokštinio rotacinio siurblio schema: *1* – rotorius, *2* – korpusas, *3* – plokštelės, *4* – darbo erdvė, *5* – įsiurbimo vamzdis, *6* – slėgimo vamzdis

Sukantis rotoriui, plokštelės *3*, veikiamos išcentrinių jėgų, išlenda iš išpjovų ir jų galai ima slysti vidine korpuso sienele. Todėl pjautuvo formos darbo erdvė *4* suskirstoma į siurbimo ir slėgimo kameras. Siurbimo kameros tūris, plokštelei judant nuo įsiurbimo vamzdžio *5*, didėja, todėl siurbimo kameroje susidaro vakuumas ir pro vamzdį *5* skystis įsiurbiamas į siurblio darbo kamerą. Plokštelei perėjus korpuso *2* vertikaliąją ašį, kameros tūris mažėja ir skystis iš siurblio patenka į slėgimo liniją.

Skysčio transportavimas plokštiniais rotaciniais siurbliais yra tolygus ir keičiamas, keičiant rotoriaus sukimosi dažnį. Teorinis plokštinių siurblių, kaip ir visų tūrinių siurblių, našumas nepriklauso nuo sudaromo slėgio aukščio. Praktiškai, didėjant slėgio aukščiui, šiek tiek mažėja našumas dėl skysčio pratekėjimo pro plyšius siurblio viduje. Plokštelės iš išpjovų turi išlįsti ne daugiau kaip 40 % savo ilgio. Šios plokštelės, sukdamosi kartu su rotoriumi, stumia skystį iš siurbimo vamzdžio *1* į slėgimo vamzdį *5*. Rotoriuje būna iki 12 plokštelių. Kuo jų mažiau, tuo netolygiau veikia siurblys. Plokštiniams rotaciniams siurbliams būdinga tai, kad, pakeitus rotoriaus sukimosi kryptį, pasikeičia ir skysčio tekėjimo kryptis.

8.2.5. Pneumatiniai skysčio kėlikliai

Pneumatiniai skysčio kėlikliai, kitaip dar vadinami montežiu (8.17 pav.), yra uždaras rezervuaras *1*, į kurį, atidarius čiaupą *2*, patenka skystis. Užpildant rezervuarą, dar turi būti atidarytas čiaupas *4*, kad pro jį skystis išstumtų iš rezervuaro orą. Pripildžius rezervuarą skysčio, čiaupai *2* ir *4* uždaromi. Tada atidaromas slėgimo linijos čiaupas *6* bei suslėgto oro čiaupas *3* ir skystis, slegiamas oro, vamzdžiu *6* kyla iš rezervuaro *1*. Išstūmus skystį, uždaromas čiaupas *3* ir atidaromas čiaupas *4*, kad išeitų suslėgtas oras. Po to darbo ciklas kartojasi. Montežiu neturi judančių dalių. Jie naudojami agresyviems skysčiams ir suspensijoms transportuoti. Naudingumo koeficientas mažas – $\eta = 0{,}10...0{,}20$.



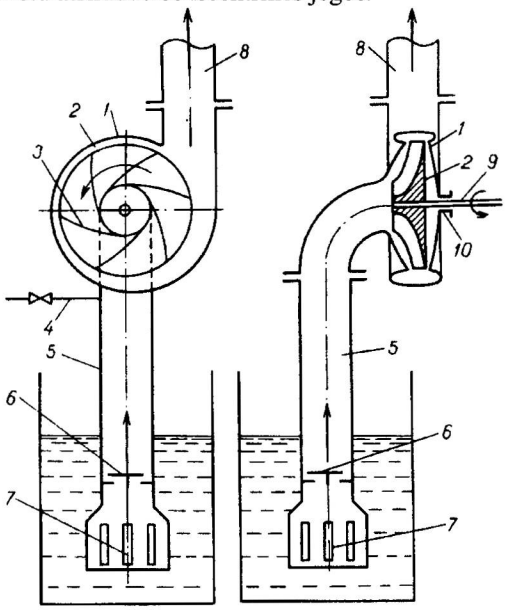
8.17 pav. Pneumatinio skysčio kėliklio schema: *1* – korpusas, *2* – transportuojamojo skysčio tiekimo linija, *3* – suslėgtų dujų tiekimo linija, *4* – oro šalinimo linija, *5* – vakuumo linija, *6* – slėgimo linija

8.3. Dinaminiai siurbliai

8.3.1. Išcentriniai siurbliai

Chemijos pramonėje dažniausiai naudojami išcentriniai siurbliai. Jie yra paprastos konstrukcijos, užima mažai vietos, jungiami tiesiai su varikliu, neturi vožtuvų, gali transportuoti suspensijas, veikia tolygiai. Be to, išcentrinių siurblių našumą galima lengvai reguliuoti slėgimo linijoje įmontuotu čiaupu.

Pagrindinis išcentrinių siurblių (8.18 pav.) darbo elementas yra spiralės formos korpuse *1* laisvai besisukantis siurbliaratis *2*, tvirtinamas ant veleno *9*. Tarp siurbliaračio diskų yra juos jungiančios lenktos mentelės *3*. Disko ir mentelių vidiniai paviršiai sudaro siurbliaračio kanalus, kurie, dirbant siurbliui, būna pripildyti transportuojamojo skysčio. Išcentriniuose siurbliuose skysčiai įsiurbiami ir suslegiami nenutrūkstamai ir tolygiai, veikiami siurbliaračio sukimosi metu atsiradusios išcentrinės jėgos.



8.18 pav. Išcentrinio siurblio schema:
1 – korpusas, *2* – siurbliaratis, *3* – mentelės, *4* – linija, kuria prieš įjungimą siurblis pripildomas skysčio, *5* – siurbimo vamzdis, *6* – atbulinis vožtuvas, *7* – filtras, *8* – slėgimo vamzdis, *9* – velenas, *10* – riebokšlis

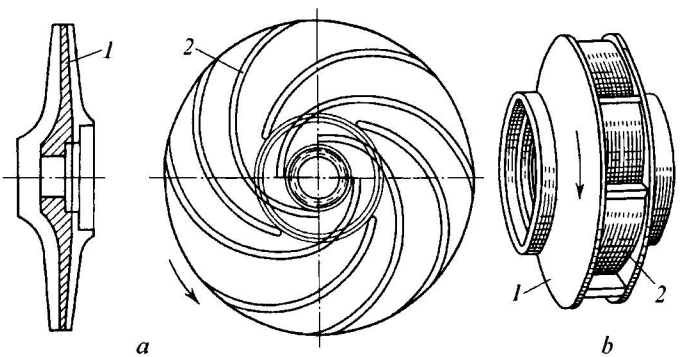
Sukantis siurbliaračiui, kiekvieną nuo veleno centro atstumu r nutolusią m masės skysčio dalelę veikianti išcentrinė jėga C apskaičiuojama pagal lygtį

$$C = m \cdot \omega^2 \cdot r; \qquad (8.15)$$

čia ω – kampinis veleno sukimosi greitis, rad/s.

Sukantis siurbliaračiui *2*, skystis, stumiamas menčių ir bloškiamas išcentrinės jėgos, iš centro patenka į pakraščius ir toliau liestinės kryptimi į slėgimo linijos vamzdį. Skysčiui ištekant iš siurbliaračio, sumažėja jo greitis, todėl skysčio kinetinė energija virsta slėgio potencine energija, kuri reikalinga skysčiui pakelti į nurodytą aukštį. Tuo metu išcentrinės jėgos veikiamo siurbliaračio centre susidaro vakuumas, dėl kurio skystis nenutrūkstamai kyla įsiurbimo vamzdžiu į erdvę tarp siurblio korpuso, o po to – į kanalus tarp siurbliaračio mentelių. Jeigu prieš įjungiant išcentrinį siurblį siurbimo vamzdis *5* ir korpusas *1* nepripildyti skysčio, tai sukantis siurbliaračiui jo centre susidariusio vakuumo nepakanka skysčiui pakelti. Todėl vamzdžiu *4* siurblys pripildomas skysčio. Tam, kad skystis neištekėtų iš siurblio, siurbimo linijoje įtaisomas atbulinis vožtuvas *6*. Siurblys sandarinamas riebokšliu *10* arba (beriebokšliai siurbliai) specialiu sandarinimo mazgu. Skysčiui ištekėti iš siurblio korpuse yra platėjanti spiralės formos kamera; skystis iš siurbliaračio pradžioje patenka į šią kamerą, o paskui į slėgimo vamzdį *8*.

Išcentrinių siurblių siurbliaračių konstrukcija pavaizduota (8.19 pav.).



8.19 pav. Išcentrinio siurblio siurbliaračio konstrukcijos:
a – atviras, *b* – uždaras; *1* – diskai, *2* – mentelės

Vieno siurbliaračio išcentrinių siurblių pakėlimo aukštis nedidelis (ne didesnis kaip 50...100 m transportuojamojo skysčio stulpo aukščio). Pakėlimo aukščiui padidinti naudojami daugiapakopiai siurbliai. Juose skystis nuosekliai transportuojamas per keletą ant vieno veleno sumontuotų siurbliaračių. Teoriškai tokio siurblio sudaromo slėgio aukštis lygus atskiruose siurbliaračiuose sudaromų slėgių aukščių sumai.

Išcentrinių siurblių klasifikavimas. Dažniausiai išcentriniai siurbliai klasifikuojami pagal tris požymius: siurblio sudaromo slėgio aukštį, siurbliaračio menčių skaičių ir siurbliaračių konstrukciją.

1. Atsižvelgiant į *sudaromo slėgio aukštį H,* siurbliai būna:

a) mažo slėgio, kai $H < 20$ m;

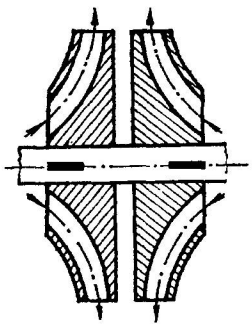
b) vidutinio slėgio, kai $20 < H < 60$ m;

c) didelio slėgio, kai $H > 60$ m.

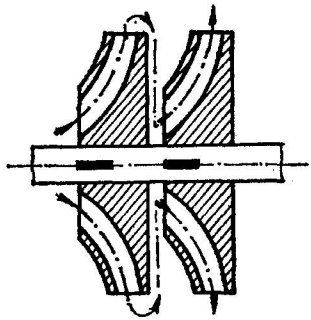
Išcentrinio siurblio sudaromo slėgio aukštis priklauso nuo siurbliaračio skersmens ir sukimosi dažnio. Abu šiuos dydžius galima didinti tik iki tam tikrų ribinių verčių, nes, didinant skersmenį, didėja hidraulinis pasipriešinimas, o sukimosi dažnį riboja siurbliaračio medžiagos mechaninis atsparumas. Išcentrinio siurblio sukimosi dažnis visada būna toks pat kaip ir variklio.

2. Pagal *menčių skaičių* skiriami mažai menčių (2...8) turintys ir daug menčių turintys siurbliai. Mažiausiai siurbliaratyje būna dvi mentės. Siurbliais, turinčiais mažai menčių, transportuojami skysčiai su kietų medžiagų priemaišomis. Siurbliais, kurių siurbliaratyje yra aštuonios arba daugiau menčių, dažniausiai transportuojami švarūs skysčiai.

3. Pagal *konstrukciją* (8.19 pav.) ir *jungimo būdą* siurbliaračiai gali būti atviri arba uždari, sujungti lygiagrečiai arba nuosekliai. Lygiagrečiai sujungus du (8.20 pav.) ar daugiau siurbliaračių, padidėja bendras siurblio našumas. Pagal siurbliaračių skaičių tokie siurbliai vadinami viengubaisiais, dvigubaisiais ir kt. Nuosekliai sujungus kelis siurbliaračius ant vieno veleno (8.21 pav.), padidėja sudaromo slėgio aukštis. Tokie siurbliai vadinami vienpakopiais, dvipakopiais ir daugiapakopiais (pavadinimas priklauso nuo siurbliaračių skaičiaus).



8.20 pav. Lygiagrečiai sujungti siurbliaračiai

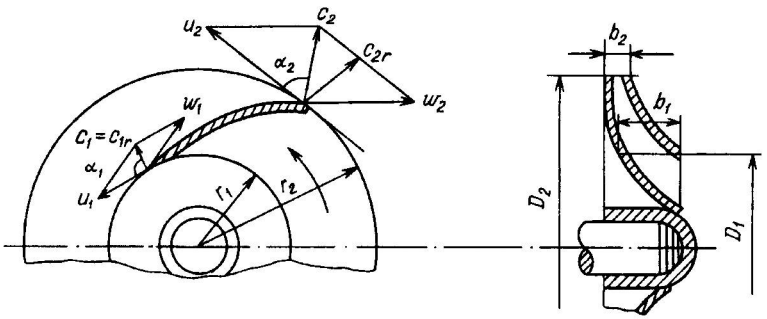


8.21 pav. Nuosekliai sujungti siurbliaračiai

Sistemos našumui ir sudaromam slėgiui padidinti lygiagrečiai arba nuosekliai gali būti jungiami ir patys išcentriniai siurbliai.

Išcentrinio siurblio pagrindinė lygtis. Išcentrinio siurblio sudaroma išcentrinė jėga, o kartu slėgio aukštis didėja didėjant siurbliaračio kampiniam greičiui ω ir spinduliui r, o kampinis greitis proporcingas siurbliaračio sukimosi dažniui. Nustatysime ryšį tarp siurblio sudaromo slėgio aukščio ir jį nusakančių dydžių, atsižvelgdami į specifines išcentrinių siurblių darbo sąlygas.

Skysčio dalelių judėjimas besisukančio siurbliaračio tarpmentiniame kanale yra sudėtingas. Todėl, teoriškai nagrinėjant skysčio tekėjimą siurbliaratyje, daroma prielaida, kad skysčio dalelės juda lygiagrečiai su mentėmis. Skysčio tekėjimas kanalais tarp siubliaračio mentelių (8.22 pav.) yra sudėtingos struktūros: viena vertus, jis juda išilgai kanalų, o kita vertus, – įgauna judesį rato, kurio apskritiminis sukimosi greitis $u = \pi \cdot D \cdot n/60$ (čia D – skysčio dalelės judėjimo trajektorijos skersmuo, m; n – rato sukimosi dažnis, min^{-1}), sukimosi kryptimi. Apskritiminio sukimosi greičio vektoriaus kryptis sutampa su bet kurio tiriamojo apskritimo taško liestine. Be to, skystis įgauna ir reliatyvųjį judėjimo greitį w, kurio vektoriaus kryptis sutampa su liestinės kryptimi. Absoliutusis dalelės judėjimo greitis c priklauso nuo apskritiminio ir reliatyviojo greičių ir gali būti apskaičiuotas pagal lygiagretainio taisyklę.



8.22 pav. Skysčio tekėjimas išcentrinio siurblio mente

Nagrinėsime į siurbliaratį įtekančio ir iš jo ištekančio skysčio greitį. Sudarę greičių lygiagretainį (8.22 pav.), nustatysime į siurbliaratį kampu α_1 įtekančio skysčio greitį c_1 ir iš siurbliaračio kampu α_2 ištekančio skysčio greitį c_2. Išcentrinė jėga C, veikianti masės m skysčio dalelę, apskaičiuojama pagal (8.1) lygtį. Išcentrinės jėgos atliktas darbas W, J, čiurkšlės ilgio elementui dr apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$dW_r = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot dr = G \cdot \omega^2 \cdot r \cdot dr/g ;$$

čia G – skysčio dalelės svoris, N; ω – kampinis veleno sukimosi greitis, rad/s.

Tada išcentrinės jėgos darbas, atliktas nuėjus kelią nuo r_1 iki r_2, apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$W_r = \int_{r1}^{r2} G \cdot \omega^2 \cdot r \cdot dr / g = G \cdot \omega^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)/(2 \cdot g).$$

Tačiau $r_1^2 \cdot \omega^2 = u_1^2$ ir $r_2^2 \cdot \omega^2 = u_2^2$, tada $W_r = G \cdot (u_2^2 - u_1^2)/2 \cdot g$. Iš čia gauname:

$$W_r = G \cdot (u_2^2 - u_1^2)/2 \cdot g.$$

Savitasis darbas W, t. y. skysčio masės vieneto atliktas darbas, yra lygus siurblyje gautai savitajai energijai. Tada:

$$W = (u_2^2 - u_1^2)/2. \qquad (8.16)$$

Apskaičiuosime visuminį siurblio sudaromo slėgio aukštį, laikydami, kad siurbliaratis yra ramybės būsenos (atskaitymo plokštuma imame siurbliaračio plokštumą, t. y. visuose taškuose, srautui įtekant į ratą ir ištekant iš jo, $z_1 = z_2$).

Kai slėgio aukščio nuostoliai $h_n = 0$ (t. y. teka idealus skystis):

$$p_1/(\rho \cdot g) + w_1^2/(2 \cdot g) = p_2/(\rho \cdot g) + w_2^2/(2 \cdot g); \qquad (8.17)$$

čia w_1 ir w_2 – į siurbliaratį įtekančio ir iš jo ištekančio skysčio greitis, m/s; p_1 ir p_2 – į siurbliaratį įtekančio ir iš jo ištekančio skysčio slėgis, Pa.

Esant išcentrinei jėgai (sukantis siurbliaračiui), skysčio energija padidėja dydžiu A ((8.16) lygtis), tada (8.17) lygties dešinioji pusė turi būti didesnė dydžiu A. Lygybei išlaikyti prie (8.17) lygties kairiosios pusės pridedame dydį A, apskaičiuotą pagal (8.16) lygtį:

$$p_1/(\rho \cdot g) + w_1^2/(2 \cdot g) + (u_2^2 - u_1^2)/(2 \cdot g) = p_2/(\rho \cdot g) + w_2^2/(2 \cdot g).$$

Tada siurblio sudaromas slėgis arba slėgio aukštis apskaičiuojamas pagal lygtį

$$(p_2 - p_1)/(\rho \cdot g) = H = (w_1^2 - w_2^2)/(2 \cdot g) + (u_2^2 - u_1^2)/(2 \cdot g). \qquad (8.17a)$$

Slėgio aukštis H_1, m, skysčiui įtekant į besisukantį siurbliaratį, pagal Bernulio lygtį gali būti išreikštas taip:

$$H_1 = p_1/(\rho \cdot g) + c_1^2/(2 \cdot g).$$

Slėgio aukštis H_2, m, skysčiui ištekant iš siurbliaračio, apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$H_2 = p_2/(\rho \cdot g) + c_2^2/(2 \cdot g).$$

Tada visuminis teorinis siurblio sudaromo slėgio aukštis H_T, m,

$$H_T = H_2 - H_1 = (p_2 - p_1)/(\rho \cdot g) + (c_2^2 - c_1^2)/(2 \cdot g). \qquad (8.18)$$

Iš (8.17a) ir (8.18) lygčių gauname:

$$H_T = (w_1^2 - w_2^2)/(2 \cdot g) + (u_2^2 - u_1^2)/(2 \cdot g) + (c_2^2 - c_1^2)/(2 \cdot g). \qquad (8.19)$$

Pagal greičių lygiagretainio taisyklę, srautui įtekant į siurbliaratį ir iš jo ištekant (8.20 pav.), su sąlyga, kad visos skysčio dalelės juda panašiomis trajektorijomis, gauname:

$$w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2u_1 \cdot c_1 \cdot \cos\alpha_1,$$

$$w_2^2 = u_2^2 + c_2^2 - 2u_2 \cdot c_2 \cdot \cos\alpha_2.$$

Įrašę šias išraiškas į (8.19) lygtį ir atlikę pertvarkymus, gauname:

$$H_T = (u_2 \cdot c_2 \cdot \cos\alpha_2 - u_1 \cdot c_1 \cdot \cos\alpha_2)/g. \qquad (8.20)$$

Ši lygtis vadinama pagrindine išcentrinių mašinų Eulerio lygtimi. Ji gali būti naudojama skaičiuojant visas išcentrines mašinas, įskaitant ir dujų suslėgimo ir transportavimo mašinas.

Paprastai išcentriniuose siurbliuose $\alpha_1 = 90°$, t. y. $\cos\alpha_1 = 0$. Šiuo atveju teorinis slėgio aukštis:

$$H_T = u_2 \cdot c_2 \cdot \cos\alpha_2/g. \qquad (8.20a)$$

Kadangi dalis realių skysčių energijos sunaudojama hidrauliniams nuostoliams siurblio viduje nugalėti ir ne visas skystis siurblyje juda pagal panašias trajektorijas, todėl tikrasis slėgio aukštis H visada mažesnis negu teorinis. Todėl skaičiuojant tikruosius išcentrinių siurblių slėgio aukščius, daromos atitinkamos pataisos:

$$H_R = H_T \cdot \eta_H \cdot \eta_L; \qquad (8.21)$$

čia η_H – hidraulinis naudingumo koeficientas; η_L – naudingumo koeficientas, kuriuo įvertinama tai, kad dalelių judėjimo trajektorijos yra skirtingos.

Naudingumo koeficiento η_H vertė priklauso nuo siurblio konstrukcijos bei dydžio ir būna lygi 0,8...0,95; η_L dažniausiai būna lygus 0,7...0,8.

Iš (8.20a) lygties matyti, kad, kuo mažesnis kampas α_2, tuo didesnis slėgio aukštis. Kai $\alpha_2 < 0$, teorinis slėgio aukštis yra didžiausias, t. y. šiuo atveju siurblio mentelės turi būti išlenktos į priekį sukimosi kryptimi. Tačiau trans-

portuojant klampius skysčius dėl tokio mentelių išlenkimo gerokai padidėja hidraulinis pasipriešinimas, o kartu ir energijos sąnaudos. Todėl skysčių transportavimo išcentrinių mašinų darbo ratų mentelės dažniausiai išlenkiamos atgal.

Skaičiuojant išcentrinių siurblių įsiurbimo aukštį, reikia atsižvelgti į kavitaciją. Kavitacijai pašalinti galima padidinti skysčio slėgį siurbimo linijoje arba sumažinti siurbimo aukštį. Pastaruoju atveju iš pagal (8.5b) lygtį apskaičiuotos siurbimo aukščio h_{is} vertės atimamas tam tikras aukštis, vadinamas kavitacinės atsargos aukščiu, kuris nurodomas žinynuose.

Išcentrinio siurblio našumas V_s, m^3/s, apskaičiuojamas pagal pagrindinę debito lygtį:

$$V_s = b_1 \cdot (\pi \cdot D_1 - \delta \cdot Z) \cdot c_{1r} = b_2 \cdot (\pi \cdot D_2 - \delta \cdot Z) \cdot c_{2r}; \qquad (8.22)$$

čia δ – mentelės storis, m; Z – mentelių skaičius; c_{1r} ir c_{2r} – radialinė absoliučioji greičio dedamoji, srautui įtekant į siurbliaratį ir iš jo ištekant, dažniausiai $c_{1r} = c_{2r}$.

Apytiksliams skaičiavimams imama, kad skysčio greitis c_1 lygus srauto greičiui siurbimo vamzdyje c_{1r}. Dažniausiai siurblio našumas būna žinomas ir reikia parinkti siurblį žinomam skysčio kiekiui transportuoti. Todėl (8.22) lygtis naudojama tik patikrinamiesiems skaičiavimams.

Išcentrinio siurblio veleno galia apskaičiuojama pagal (8.7) lygtį. Parenkant siurblio η, reikia prisiminti, kad siurblys prie elektros variklio jungiamas tiesiai, nenaudojant reduktoriaus.

Išcentrinių siurblių charakteristikos. Išcentrinio siurblio darbas nusakomas šiais parametrais: našumu V_s, m^3/s, sudaromu slėgiu p, Pa, arba slėgio aukščiu H, m, galia N, kW, naudingumo koeficientu η ir siurbliaračio sukimosi dažniu n, s^{-1}. Visi šie parametrai glaudžiai susiję vieni su kitais: pakitus vienam, kinta ir kiti.

Teoriškai pirmųjų trijų anksčiau minėtų parametrų (V_s, H ir N) priklausomybę nuo sukimosi dažnio nusako proporcingumo dėsniai:

1) siurblio našumas tiesiai proporcingas sukimosi dažniui:

$$\frac{V_{S1}}{V_{S2}} = \frac{n_1}{n_2}; \qquad (8.23)$$

2) siurblio sudaromas slėgio aukštis kinta proporcingai sukimosi dažniui, pakeltam kvadratu:

$$\frac{H_1}{H_2} \cong \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \qquad (8.24)$$

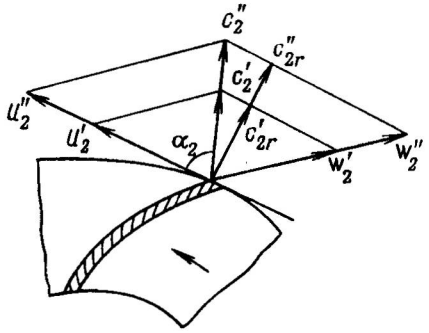
3) siurblio galia proporcinga sukimosi dažniui, pakeltam kubu:

$$\frac{N_1}{N_2} \cong \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3; \qquad (8.25)$$

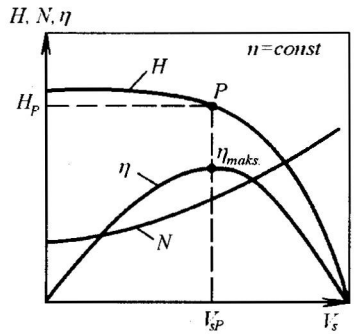
Nors tarp realių siurblių šių parametrų tokio tikslaus ryšio nėra, tačiau eksploataciniuose siurblių skaičiavimuose šios proporcingumo formulės taikomos plačiai. Jos ypač tikslios, kai išcentrinių siurblių apsisukimų skaičius kinta ne daugiau kaip du kartus. Jas taikant pagal vieną eksperimentiškai nustatytą charakteristiką (pvz., H–V_s) galima apskaičiuoti kitas išcentrinio siurblio charakteristikas esant nurodytam apsisukimo skaičiui.

Apskaičiuojant išcentrinių siurblių charakteristikas, sunkiausia būna nustatyti nuostolių, turinčių įtakos siurblio našumui ir sudaromo slėgio aukščiui, koeficientą. Todėl parenkant siurblio darbo režimą, naudojamos bandant veikiančius siurblius eksperimentiškai nustatytos charakteristikos. (Šios charakteristikos pateikiamos siurblių pasuose ir žinynuose.)

Eksperimentiniu būdu (keičiant slėgimo vamzdyje įtaisyto čiaupo atidarymo laipsnį) nustatoma išcentrinio siurblio slėgio aukščio H ir galios N priklausomybė nuo našumo V_s. Naudingumo koeficientas η, žinant našumą V_s, apskaičiuojamas pagal (8.7) lygtį. Siurbliaračiui sukantis pastoviu greičiu n, šių priklausomybių grafinis vaizdas (8.24 pav.) vadinamas siurblio charakteristikomis; pirmoji iš jų – (H–V_s) – vadinama pagrindine siurblio charakteristika.



8.23 pav. Greičių lygiagretainių panašumas, esant skirtingiems siurbliaračio sukimosi dažniams



8.24 pav. Išcentrinio siurblio charakteristikos

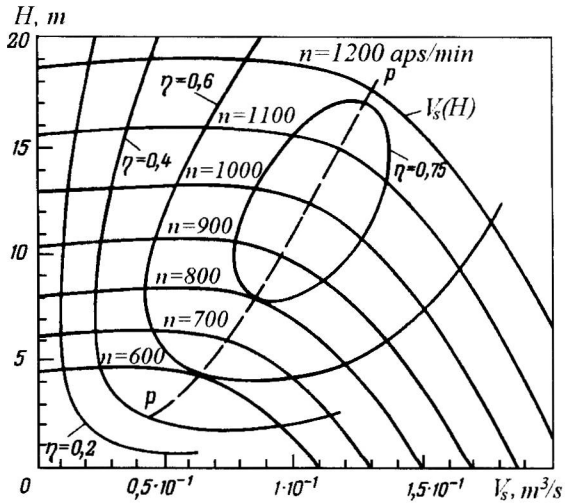
Iš 8.24 paveiksle pavaizduotų išcentrinio siurblio charakteristikų matome, kad mažiausios galios reikia, kai našumas $V_s = 0$. Todėl, prieš įjungiant siurblio variklį, rekomenduojama užsukti slėgimo vamzdžio čiaupą, o palei-

dus variklį, lėtai atidarant čiaupą, nustatyti norimą debitą. Siurblys dirba optimaliai, kai pasiekiamas maksimalus naudingumo koeficientas η (taškas P).

Visuma išcentrinio siurblio charakteristikų, atitinkančių įvairius sukimosi dažnius, vadinama *universaliąja siurblio charakteristika* (8.25 pav.). Ji sudaroma taip:

1) naudojantis eksperimentiniais duomenimis, brėžiamas pluoštas $H = f(V_s)$ kreivių, kurių kiekviena atitinka skirtingą siurbliaračio sukimosi dažnį;
2) analogiškai nubrėžiamos $N = f(V_s)$ kreivės;
3) kiekvienoje $H = f(V_s)$ kreivėje pažymimi taškai, atitinkantys vienodus naudingumo koeficientus η_i. Šiuos taškus sujungus, gaunamos kreivės $\eta_i = const$.

Naudojantis universaliąja charakteristika, galima nustatyti optimalų siurblio darbo režimą. Optimaliu sukimosi dažniu vadinamas siurbliaračio sukimosi dažnis, atitinkantis didžiausią η. Optimalus siurblio darbo režimas yra toks, kai, esant pastoviam sukimosi dažniui, gaunamas didžiausias η (linija p–p).



8.25 pav. Universalioji išcentrinio siurblio charakteristika:
p–p – optimalių siurblio darbo sąlygų linija

Išcentrinio siurblio našumas priklauso nuo slėgio aukščio ir nuo prie jo prijungto tinklo – vamzdynų ir aparatų, per kuriuos jis transportuoja skystį, hidraulinio pasipriešinimo. Todėl siurbliai ir vamzdynai (tinklai) turi būti skaičiuojami kartu.

Praktikoje hidraulinėms siurblio ir tinklo sistemoms skaičiuoti dažnai taikomas grafoanalitinis metodas. Šio metodo esmė yra ta, kad vienoje koordinačių sistemoje $H–V_s$ nubrėžiamos siurblio ir tinklo charakteristikos, kurių susikirtimo taškas A (8.26 pav.) vaizduoja siurblio darbo tašką. Šis taškas rodo, kokį maksimalų našumą gali pasiekti siurblys transportuodamas skystį prie jo prijungtu tinklu.

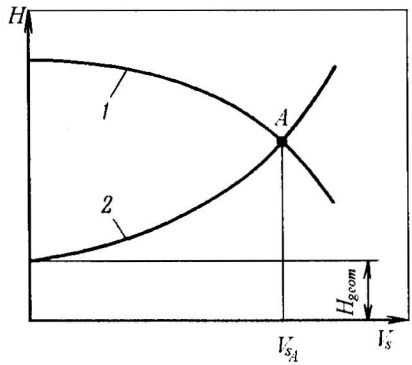
Tinklo charakteristika parodo slėgio aukščio nuostolių tinkle priklausomybę nuo našumo. Slėgio aukščio nuostoliai tinkle apskaičiuojami pagal (8.4) lygtis. (8.5) lygtyje išreiškę greitį w per $\frac{V_S}{F}$ (F – vamzdžio skerspjūvio plotas, m^2), gauname:

$$h_n = \frac{1+\zeta\cdot\frac{\ell}{d}\cdot\Sigma\zeta}{2\cdot g\cdot F^2}\cdot V_S^2. \qquad (8.26)$$

Tuomet slėgio aukščio nuostoliai tinkle apskaičiuojami taip:

$$H_v = H_{geom} + \alpha\cdot V_s^2; \qquad (8.27)$$

čia koeficientas $\alpha = \frac{1+\zeta\cdot\frac{l}{d}+\Sigma\xi}{2\cdot g\cdot F^2}$. Jis priklauso nuo tinklo parametrų ir kiekvienam tinklui yra pastovus.



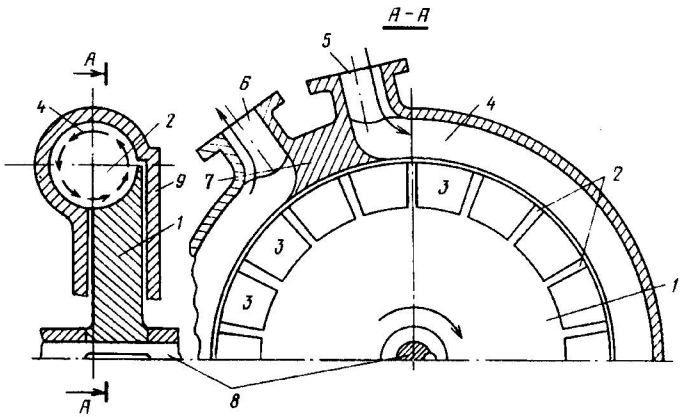
8.26 pav. Siurblio darbo taško A nustatymas:
1 – siurblio charakteristika, *2* – tinklo (vamzdyno) charakteristika

(8.27) lygtis vadinama *tinklo charakteristika.* Grafinis jos vaizdas yra parabolės pavidalo (8.26 pav., kreivė 2). Ji brėžiama tokiu pat masteliu, kaip ir siurblio charakteristika (kreivė *1*). Kreivių susikirtimo taškas A vadinamas

siurblio darbo tašku. Norint gauti didesnį už V_{sA} našumą, reikia didinti siurbliaračio sukimosi dažnį, parinkti didesnio našumo siurblį arba sumažinti hidraulinius nuostolius vamzdyne.

8.3.2. Sūkuriniai siurbliai

Sūkuriniai siurbliai (8.27 pav.) veikia panašiai kaip išcentriniai. Vienos bendros teorijos jų parametrams skaičiuoti kol kas dar nėra.

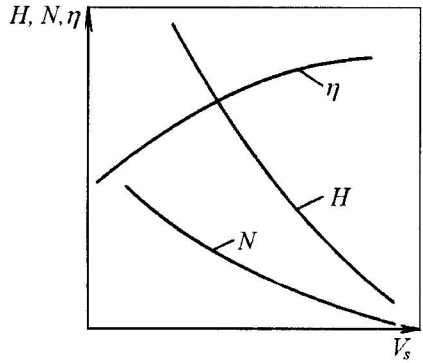


8.27 pav. Sūkurinis siurblys:
1 – siurbliaratis, *2* – mentelės, *3* – kanalai tarp mentelių, *4* – žiedo formos kanalas, *5* ir *6* – siurbimo ir slėgimo atvamzdžiai, *7* – srautų skyriklis, *8* – siurbliaračio velenas, *9* – korpusas

Sūkurinio siurblio (8.27 pav.) korpuse *9* įtaisytas plokščias siurbliaratis *1* su trumpomis spindulio kryptimi nukreiptomis mentėmis *2*, išdėstytomis rato išorėje. Korpuse *9* yra žiedo formos kanalas *4*. Tarpas tarp korpuso ir siurbliaračio gana mažas, todėl skystis gali persipilti iš siurbimo erdvės į slėgimo erdvę. Tarp siurbimo atvamzdžio *5* ir slėgimo atvamzdžio *6* yra pertvara *7*. Kad transportuojamasis skystis negalėtų iš slėgimo zonos pereiti į siurbimo zoną, tarpas tarp pertvaros *7* ir siurbliaračio menčių *2* turi būti ne didesnis kaip 0,15...0,2 mm. Skystis siurbimo atvamzdžiu *5* patenka į siurbliaračio tarpmentinę erdvę. Išcentrinės jėgos skystį bloškia į žiedinį kanalą *4*. Čia dalis skysčio kinetinės energijos virsta potencine ir skystis, spaudžiamas padidėjusio slėgio, patenka į gretimą tarpmentinę erdvę. Taigi skystis, tekėdamas nuo siurbimo atvamzdžio iki slėgimo atvamzdžio, daug kartų patenka į tarpmentinę erdvę, kur jam suteikiama papildomos kinetinės energijos, kurios dalis vėliau virsta potencine. Todėl sūkuriniai siurbliai sudaro 2...4 kartus didesnį

slėgį negu to paties skersmens siurbliaratį turintys, t. y. pasiekiantys tą patį kampinį greitį, išcentriniai siurbliai. Todėl sūkurinius siurblius galima gaminti mažesnius ir lengvesnius negu išcentrinius. Sūkurinių siurblių teigiamybė – palyginti paprasta konstrukcija. Šie siurbliai užsipildo patys, todėl prieš paleidžiant jų įsiurbimo linijos nebūtina užpildyti transportuojamuoju skysčiu. Tačiau dėl didelių nuostolių jų $\eta = 25...50$ %. Transportuojant kietomis dalelėmis užterštus skysčius, sūkurinių siurblių detalės susidėvi greičiau.

Sūkurinio siurblio charakteristikos (8.28 pav.) labai skiriasi nuo išcentrinių siurblių charakteristikų (8.24 pav.).



8.28 pav. Sūkurinio siurblio charakteristikos

Mažinant našumą, sūkurinių siurblių sudaromas slėgis ir reikalinga galia staigiai didėja ir pasiekia maksimumą, kai $V_s = 0$. Kaip ir išcentrinių siurblių, sūkurinių siurblių našumą galima reguliuoti slėgimo vamzdyje įtaisytu čiaupu. Tačiau taip reguliuojant našumą, reikia neperkrauti variklio. Dėl šios priežasties, paleidžiant variklį, slėgimo čiaupas turi būti atidarytas (priešingai negu išcentrinių siurblių). Siurblio sudaromo slėgio aukštis H, m, apskaičiuojamas taip:

$$H = \psi \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g}; \qquad (8.28)$$

čia ψ – koeficientas (apytiksliai $\psi = 3,5...4,5$); u – skysčio apskritiminis greitis, m/s.

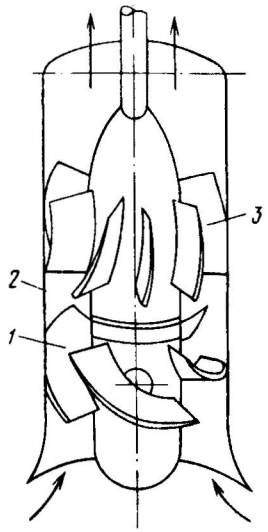
Sūkurinių siurblių sudaromas slėgio aukštis siekia iki 250 m, o našumas iki 60 m^3/h.

8.3.3. Ašiniai siurbliai

Ašinio siurblio (8.29 pav.) korpuse *2* sukamas siurbliaratis *1*, prie kurio pagal sraigtinę liniją pritvirtintos dvi eilės menčių. Apatinės mentės *4* besisukdamos griebia skystį ir kelia jį į viršų. Antroji menčių eilė *3*, vadinama kreipračiu, stabdo skysčio sukimąsi.

Ašiniuose siurbliuose nėra siurbimo vamzdžio, todėl jie turi būti panardinti į transportuojamąjį skystį. Šių siurblių sudaromo slėgio aukštis nedidelis (3...25 m), bet jie labai našūs (iki 10 m^3/s). Didelio našumo ašinių siurblių naudingumo koeficientas $\eta = 0,9$ ir daugiau.

Chemijos pramonėje ašiniai siurbliai dažniausiai naudojami skysčių cirkuliacijai įvairiuose aparatuose (pvz., garinimo) suintensyvinti.



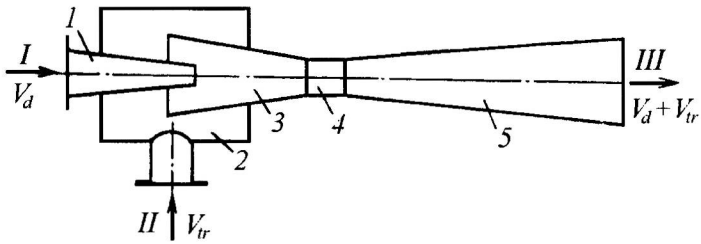
8.29 pav. Ašinio siurblio schema:
1 – siurbliaratis, *2* – korpusas, *3* – kreipratis

8.3.4. Čiurkšliniai siurbliai

Čiurkšliniais siurbliais (8.30 pav.) transportuojamas skystis energiją gauna iš darbinio skysčio – vandens arba garo.

Darbinis skystis, dideliu greičiu tekėdamas pro antgalį *1*, siurblio maišymo kameroje sudaro vakuumą, kurio pakanka skysčiui pakelti iš rezervuaro į šią kamerą. Įsiurbtas skystis greitai susimaišo su darbiniu skysčiu ir mišinys patenka į konfuzorių *3*, kuriame mišinio judėjimo greitis tolygiai didėja ir pasiekia maksimalią vertę kakliuke *4*. Difuzoriuje *5* srauto greitis mažėja ir

atitinkamai kinetinė judėjimo energija pereina į potencinę slėgio energiją, todėl mišinys į slėgimo vamzdį patenka suslėgtas.



8.30 pav. Čiurkšlinio siurblio schema:
1 – antgalis, *2* – maišymosi kamera, *3* – konfuzorius, *4* – gerklė, *5* – difuzorius; *I* – darbo agentas (garas, vanduo), *II* – transportuojamasis skystis, *III* – mišinys

Pagal darbinio skysčio tiekimą čiurkšliniai siurbliai skirstomi į inžekcinius (suslegiančiuosius) ir ežekcinius (siurbiančiuosius). Ežekciniuose siurbliuose darbinis skystis dažniausiai būna vanduo, o inžekciniuose – garas.

Čiurkšlinių siurblių našumas įvertinamas inžekcijos koeficientu $k_{in} = V_{tr}/V_d$ (V_{tr} – transportuojamojo skysčio debitas, V_d – darbinio skysčio debitas). Esant bet kokiai inžekcijos koeficiento vertei, čiurkšlinių siurblių sudaromas slėgis didėja mažėjant maišymo kameros skerspjūvio ploto ir darbinio skysčio tiekimo antgalio skerspjūvio ploto santykiui. Mažėjant inžekcijos koeficientui, padidėja čiurkšlinio siurblio sudaromas slėgis.

Čiurkšlinių siurblių konstrukcija yra paprasta, nes nėra judančių dalių, tačiau jų naudingumo koeficientas labai mažas (0,15...0,25). Čiurkšliniai siurbliai naudojami, kai galima maišyti transportuojamąjį ir darbinį skysčius ir kai reikalingas nedidelis slėgio aukštis.

Ežektoriai naudojami termofikaciniuose tinkluose šiltam ir šaltam vandeniui maišyti, vandeniui su kietų dalelių priemaišomis transportuoti, skysčiams iš rūsių siurbti ir kt.

Inžektoriai dažniausiai naudojami vandeniui tiekti į garo katilus.

8.3.5. Oriniai skysčio kėlikliai

Orinio kėliklio schema pavaizduota 8.31 paveiksle. Šie siurbliai dažnai vadinami erliftais arba dujų liftais. Kompresoriaus suslėgtas oras vamzdžiu *1* tiekiamas į maišytuvą *2*. Susidariusio skysčio ir oro mišinio tankis yra mažesnis už gryno skysčio tankį, todėl toks mišinys (pagal susisiekiančiųjų indų principą) kyla vamzdžiu *3* į viršų ir atsimuša į skirtuvą *4*; čia nuo jo atsiskiria oras, o skystis surenkamas rinktuve *5*.

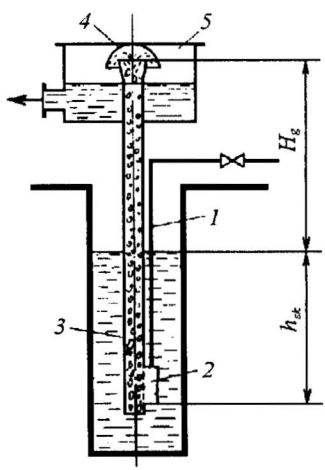
Pakėlimo aukštis H_g, m, nepaisant aukščio nuostolių vamzdyje, apskaičiuojamas taip:

$$H_g = h_{sk} \cdot (\rho_{sk} - \rho_{miš}) / \rho_{miš} \; ; \qquad (8.29)$$

čia h_{sk} – vertikalus atstumas tarp skysčio lygio ir maišymo kameros apačios, m; $\rho_{miš}$ – dujų ir skysčio mišinio tankis, kg/m^3; ρ_{sk} – skysčio tankis, kg/m^3.

Pakėlimo aukštis H_g paprastai būna ne didesnis kaip 8 metrai (teoriškai 10,33 m).

Be pakėlimo aukščio, skaičiuojamos orinių skysčio kėliklių suslėgto oro sąnaudos, kurios, nepaisant oro nuostolių, prilyginamos oro savitųjų sąnaudų (oro kiekio (m^3), reikalingo 1 m^3 skysčio pakelti) ir kėliklio našumo (m^3/s) sandaugai. Eksperimentiškai nustatyta, kad vidutinės savitosios oro sąnaudos lygios 3,7 m^3/m^3 skysčio.



8.31 pav. Orinio skysčių kėliklio schema: *1* – suslėgto oro vamzdis, *2* – dujų skirstytuvas, *3* – pakėlimo vamzdis, *4* – oro skirtuvas, *5* – rinktuvas

Oro kėliklių naudingumo koeficientas mažas – $\eta = 0{,}15...0{,}20$. Didžiausia jų teigiamybė ta, kad nėra judančių dalių.

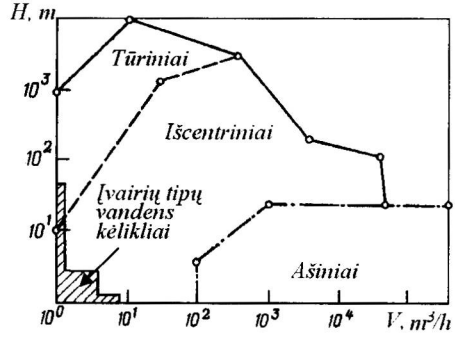
Erliftai naudojami, kai skysčius reikia pakelti iš gilių gręžinių, taip pat kai reikia intensyvinti daugelio chemijos ir maisto pramonės technologinių procesų metu cirkuliuojančių skysčių ir dujų sąveiką.

8.4. Įvairių tipų siurblių teigiamybės ir trūkumai

Šios dalies pabaigoje apžvelgsime įvairių siurblių teigiamybes, trūkumus ir jų galimo naudojimo sritis.

Pagal našumą siurbliai gali būti išdėstyti tokia eile (8.32 pav.): tūriniai, išcentriniai, ašiniai. Jeigu skirstysime pagal sudaromo slėgio aukštį, eilutė bus atvirkščia.

Specialūs siurbliai (įvairių tipų skysčio kėlikliai) pagal V ir H vertes schemoje užima sritis, artimas koordinačių ašims, ir yra apibūdinami arba mažu našumu V, arba mažu sudaromo slėgio aukščiu H. Praktiškai įvairių siurblių sudaromo slėgio aukštis yra nuo 1 iki 10^4 m ir pasiekiamas nuo kelių dm^3/h iki $1{,}5 \cdot 10^5$ m^3/h našumas.



8.32 pav. Įvairių siurblių pasiekiami našumai ir skysčių pakėlimo aukščiai

Tūriniai siurbliai. Didelį naudingumo koeficientą turinčiais stūmokliniais ir plunžeriniais siurbliais galima tiekti nedidelius kiekius skysčių, tarp jų ir labai klampių, esant bet kokiems pasirinktiems slėgiams. Tačiau dėl netolygaus skysčių tiekimo, greito vožtuvų susidėvėjimo, didelės masės ir tūrio, triukšmingo darbo, sunkaus ir sudėtingo prijungimo prie elektros variklio stūmokliniai ir plunžeriniai siurbliai chemijos ir maisto pramonėje naudojami ribotai. Reikia pasakyti, kad plunžerinių siurblių eksploatacija kiek paprastesnė, kadangi juose mažiau greitai susidėvinčių detalių (nėra stūmoklių žiedų ir kt.).

Tūrinių siurblių su besisukančiais darbo elementais (krumpliaratinių, sraigtinių) konstrukcija paprastesnė, ir jie tolygiai transportuoja skystį. Jie naudojami klampių skysčių mažiems kiekiams transportuoti. Užterštiems skysčiams transportuoti jie netinka.

Išcentriniai ir ašiniai siurbliai. Šie siurbliai tolygiai ir nenutrūkstamai transportuoja skystį ir turi gana didelį naudingumo koeficientą. Jie yra palyginti paprastos konstrukcijos, todėl patikimi ir ilgaamžiai. Kadangi tarp siur-

blių darbo elementų nėra trynimosi paviršiaus, jais galima transportuoti ir užterštus skysčius. Dėl paprasto tiesioginio prijungimo prie dideliais apsisukimais besisukančių elektros variklių siurbliai yra kompaktiški, didesnis jų naudingumo koeficientas. Todėl išcentriniai siurbliai dažniausiai naudojami chemijos ir maisto pramonėje.

Išcentrinių siurblių trūkumu laikoma tai, kad jie nelabai tinka transportuoti nedideliems skysčio kiekiams ir kai reikia sudaryti didelius slėgius. Tai paaiškinama tuo, kad, didėjant pakopų skaičiui, reikalingam pakankamai dideliam slėgio aukščiui H pasiekti, sumažėja naudingumo koeficientas. Šių trūkumų neturi sūkuriniai siurbliai. Tačiau dėl mažo naudingumo koeficiento jie naudojami retai.

Čiurkšliniai siurbliai. Šie siurbliai yra paprastos konstrukcijos, gali transportuoti daug pakibusių dalelių turinčius skysčius ir dirba labai patikimai. Pramonėje tokiais siurbliais dažnai šalinamas vanduo iš įvairių duobių ir gręžinių, o didelėse siurblinėse jie naudojami kaip pagalbiniai aparatai pagrindiniams siurbliams prieš įjungimą užpildyti skysčiu, taip pat išcentrinių siurblių įsiurbimo aukščiui padidinti. Kaip darbinį agentą naudojant garus, šiais siurbliais galima tiekti vandenį į garo katilus, sudaryti vakuumą ir t. t. Čiurkšlinių siurblių trūkumais laikomas mažas jų naudingumo koeficientas ir didelės didelio slėgio darbinio agento sąnaudos. Be to, čiurkšlinius siurblius galima naudoti tik tais atvejais, kai darbinis agentas gali maišytis su transportuojamuoju skysčiu.

Oriniai (dujiniai) kėlikliai. Dėl paprastos konstrukcijos, lengvo aptarnavimo ir patikimo darbo jie dažnai gali sėkmingai konkuruoti su išcentriniais siurbliais, pvz., siurbiant skystį iš gilių gręžinių, transportuojant agresyvius skysčius ir t. t. Tačiau dėl būtinumo labai giliai įrengti purkštukus ir dėl mažo naudingumo koeficiento šie siurbliai naudojami ribotai.

Reikia pasakyti, kad kiekvienu konkrečiu atveju parenkamas tokio tipo siurblys, kurio konstrukcinės ir eksploatacinės charakteristikos labiausiai tenkina technologinį procesą.

9 DALIS

DUJŲ SUSLĖGIMAS IR TRANSPORTAVIMAS

Chemijos, maisto ir kitose pramonės įmonėse plačiai naudojamos ir transportuojamos suslėgtos dujos. Mašinos, naudojamos dujoms suslėgti ir transportuoti, vadinamos kompresorinėmis mašinomis.

Suslėgtų dujų slėgio p_2 ir aplinkos, iš kurios siurbiamos dujos, slėgio p_1 santykis vadinamas *suslėgimo laipsniu.*

Pagal suslėgimo laipsnį kompresorinės mašinos skirstomos į tokias grupes:

1) ventiliatoriai, kai $\frac{p_2}{p_1} < 1{,}15$. Jie skirti dideliems mažo slėgio dujų kiekiams transportuoti per nedidelius hidraulinius pasipriešinimus turinčias sistemas;

2) dujopūtės, kai $1{,}15 < \frac{p_2}{p_1} < 3{,}0$ (vidutinio slėgio). Jomis transportuojami dideli dujų kiekiai per sistemas, turinčias didelį hidraulinį pasipriešinimą;

3) *kompresoriai*, kai $\frac{p_2}{p_1} > 3{,}0$. Jie skirti dideliam dujų slėgiui sudaryti.

Kompresorinės mašinos dar naudojamos ir vakuumui sudaryti (dujoms išsiurbti). Nedaug dujos praretinamos ventiliatoriais ir dujopūtėmis, kurie vadinami *ekshausteriais.* Didesniam vakuumui, t. y. absoliučiajam slėgiui, mažesniam kaip 50 kPa, sudaryti naudojami *vakuuminiai siurbliai,* kurių veikimo principas ir konstrukcija tokia pat kaip ir kompresorių.

Pagal veikimo principą kompresorinės mašinos skirstomos į:

1) *stūmoklines* (kompresoriai); 2) *išcentrines* (ventiliatoriai, turbininės dujopūtės, turbokompresoriai); 3) *ašines* (ventiliatoriai ir turbokompresoriai); 4) *rotacines* (dujopūtės, kompresoriai).

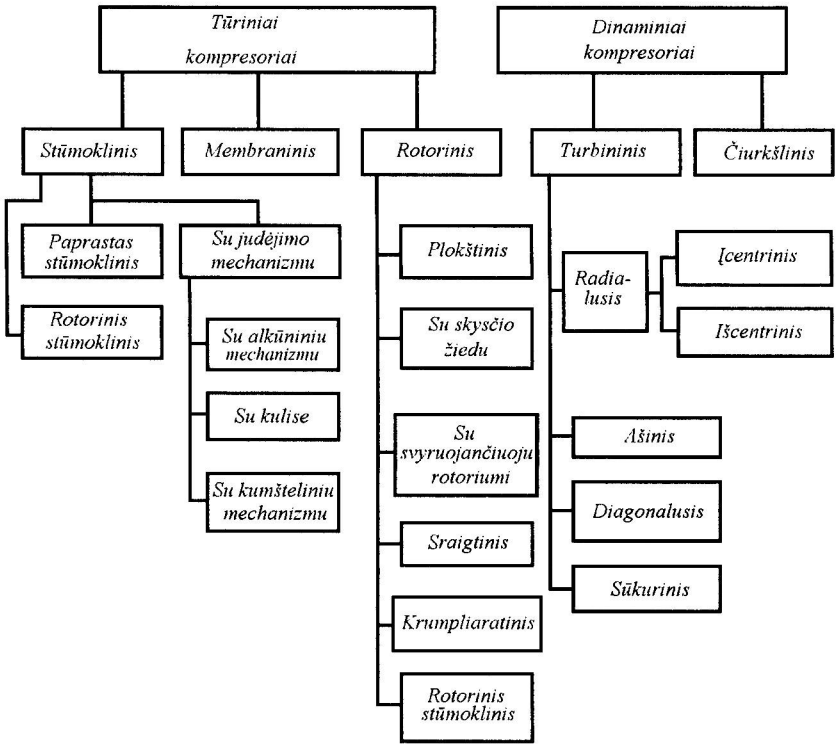
Kompresorines mašinas taip pat galima skirstyti į *vienpakopes* ir *daugiapakopes.*

Pagrindinių tipų kompresorių klasifikacija pavaizduota 9.1 pav.

Kadangi ventiliatoriumi pasiekiamas nedidelis suslėgimo laipsnis, dujų tankio pasikeitimo galima nepaisyti. Todėl pagrindiniai ventiliatoriaus parametrai (našumas, sudaromo slėgio aukštis ir reikalinga galia) apskaičiuojami taip pat, kaip išcentrinių siurblių (8 dalis).

Pagal suslėgimo principą kompresoriai skirstomi į tūrinius ir dinaminius. Tūriniuose dujos suslegiamos periodiškai mažinant jų užimamą tūrį. Jie dar skirstomi į stūmoklinius, membraninius ir rotorinius. Dinaminiuose kompresoriuose suslegiama nenutrūkstamai didinant dujų srauto greitį. Pagal veikimo principą jie skirstomi į turbininius ir čiurkšlinius.

Pagal darbo metu sudaromą slėgį visi kompresoriai skirstomi į vakuuminius (dujų slėgis prieš suslėgimą mažesnis už atmosferos slėgį), mažo slėgio (suslėgtų dujų slėgis 0,115...1,0 MPa), vidutinio slėgio (suslėgtų dujų slėgis 1,0...100 MPa), didelio slėgio (suslėgtų dujų slėgis didesnis kaip 100 MPa).



9.1 pav. Dažniausiai naudojamų kompresorinių mašinų klasifikacija

Reikiamas slėgis gali būti pasiekiamas vienpakopiu kompresoriumi, keliais nuosekliai dirbančiais vienpakopiais kompresoriais arba daugiapakopiu kompresoriumi. Kompresoriaus darbą apibūdina: tiekiamas tūrio debitas (našumas) V, siurbiamų dujų slėgis p_1, suslėgtų dujų slėgis p_2, suslėgimo laipsnis i, kompresoriaus velenui tiekiama galia N_v.

Kad geriau suprastume šiuos parametrus bei slėgimo sąlygas ir kompresoriaus konstrukciją, panagrinėsime slėgimo proceso termodinaminius pagrindus.

9.1. Dujų slėgimo termodinamikos pradmenys

Slegiamų dujų kinta tūris, slėgis ir temperatūra. Kai slėgis ne didesnis kaip 1 MPa, šių parametrų ryšį gana tiksliai aprašo idealiųjų dujų būsenos lygtis:

$$p \cdot v = R \cdot T; \qquad (9.1)$$

čia p – slėgis, Pa; v – dujų savitasis tūris, m^3/kg; R – universalioji dujų konstanta, t. y. darbas, kurį atlieka išsiplėsdamas 1 kg dujų, pašildytų vienu laipsniu, J/(kg·K); T – absoliučioji temperatūra, K.

Dujoms, kurių slėgis didesnis kaip 1 MPa, taikoma tikslesnė van der Valso lygtis:

$$\left(p + \frac{\alpha}{v^2}\right) \cdot (v - b) = R \cdot T; \qquad (9.2)$$

čia $\frac{\alpha}{v^2}$ – slėgio pataisa dėl tarpmolekulinių jėgų; b – pataisa dėl molekulių savitojo tūrio.

Dujoms, kurių slėgis didesnis kaip 10 MPa, taip pat taikoma realiųjų dujų lygtis:

$$p \cdot v = z \cdot R \cdot T; \qquad (9.3)$$

čia z – dujų susislėgimo koeficientas. Jo vertės pateikiamos žinynuose.

Dujų suslėgimas gali būti trejopas: 1) izoterminis, kai dujoms suslėgti sunaudotas darbas paverčiamas šiluma, kuri vėliau visa atiduodama į aplinką, t. y. dujų temperatūra lieka pastovi; 2) adiabatinis, kai visa išsiskyrusi šiluma sunaudojama dujų vidinei energijai didinti ir dėl to pakyla jų temperatūra; 3) politropinis, kai dalis slėgimo metu išsiskyrusios šilumos sunaudojama vidinei energijai didinti, o kita dalis atiduodama į aplinką. Praktiškai dujų suslėgimo procesas yra politropinis. Politropinis procesas yra bendra termodi-

naminio proceso forma ir vyksta kompresoriuose priklausomai nuo vidinių ir išorinių sąlygų, kai politropės rodiklis $n = 1{,}15...1{,}80$.

Pagal pirmąjį termodinamikos dėsnį ir idealiųjų dujų būsenos lygtis gauname tokias kompresoriuose vykstančių procesų lygtis:

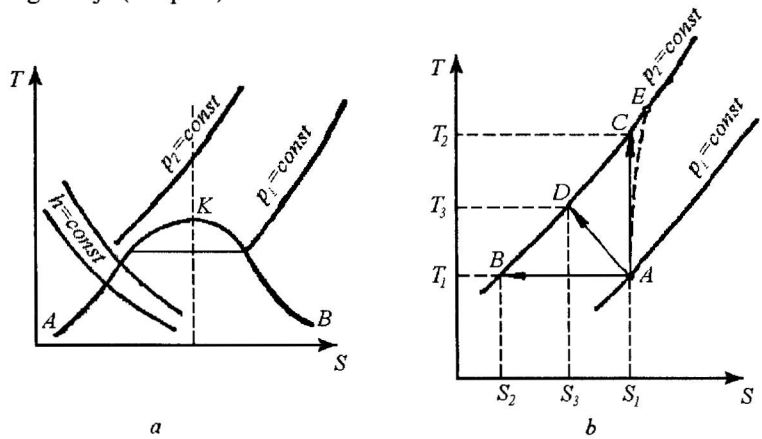
vykstant politropiniam procesui, $p/\rho^n = const$, $p \cdot v^n = const$, (9.4)

vykstant adiabatiniam procesui, $p/\rho^k = const$, $p \cdot v^k = const$, (9.5)

vykstant izoterminiam procesui, $p/\rho = const$, $p \cdot v = const$. (9.6)

Kai kada nagrinėjamas izoentropinis procesas, kurio metu, nesant šilumos mainų su aplinka ir vidinio šilumos išsiskyrimo, dėl vidinės trinties dujų srauto entropija S lieka pastovi. Realiuose kompresoriuose izoentropinis procesas negali vykti.

Visus šiuos procesus patogu atvaizduoti ir praktinius skaičiavimus atlikti T–S diagramoje (9.2 pav.).



9.2 pav. T–S diagrama (*a*) ir dujų slėgimo proceso atvaizdavimas joje (*b*)

T–S diagramoje nubrėžta ribinė kreivė, kurios viršutinis taškas K atitinka slegiamų dujų kritinį tašką. Po kreive esanti sritis atitinka suskystintųjų dujų būseną. Kreivės atkarpa AK vaizduoja dujų perėjimą į skysčio būseną (garų kondensavimosi kreivė), o atkarpa KB – skysčio perėjimą į dujų būseną (skysčio išgaravimo kreivė). Virš atkarpos AK yra skystosios fazės sritis, o virš atkarpos KB – dujų (garų) fazės sritis.

Be to, T–S diagramoje yra izoentalpių ($h = const$) ir izobarių ($p = const$) linijos. Idealiųjų dujų izoentalpės sutampa su izotermėmis (horizontaliosiomis tiesėmis). Realiųjų dujų entalpės priklauso ne tik nuo temperatūros, bet ir nuo slėgio, todėl jos nesutampa su izotermėmis.

Iš termodinamikos žinoma, kad entropija yra tam tikra kūno būsenos funkcija. Jei procesas grįžtamasis, suteikus kūnui šilumos kiekį dQ, J/kg, entropija padidėja dydžiu

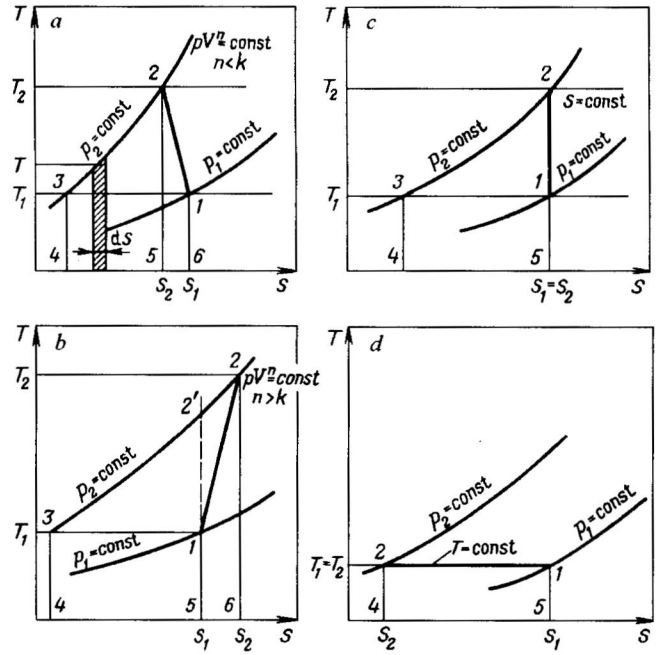
$$dS = \frac{dQ}{T}. \qquad (9.6a)$$

Šilumos kiekį, kuris išsiskiria kintant dujų būsenai, galima apskaičiuoti iš lygties

$$Q = \int T \cdot dS\,. \qquad (9.6b)$$

T–S diagramoje plotas po kreive *AKB* rodo šilumos kiekį.

9.3 paveiksle pavaizduoti pagrindiniai dujų suslėgimo procesai: politropinis, kai $n < k$ (k – adiabatės rodiklis), vykstantis vandeniu intensyviai aušinamuose kompresoriuose (9.3 pav., *a*); politropinis, kai $n > k$, tipinis procesas, vykstantis išcentriniuose ir ašiniuose kompresoriuose (9.3 pav., *b*); politropinis procesas, kurio metu $S = const$ (9.3 pav., *c*); izoterminis ($T = const$).



9.3 pav. Dujų suslėgimo procesai *T–S* diagramoje:
a, b, c – politropinis, *d* – izoterminis

9.3 pav., *c* ir *d*, grafikuose pavaizduoti procesai yra nerealūs ir naudojami tik jų energiniam efektyvumui įvertinti. Suslėgimo procesas visais keturiais atvejais vaizduojamas linija *1–2*.

9.2 pav., *a* ir *b*, pavaizduoti entropės kitimo ir temperatūros padidėjimo lydimi dujų suslėgimo procesai, kurių metu dujų entalpija didėja.

Politropinio proceso metu, kai $n < k$ (9.3 pav., a), linija *1–2* vaizduoja dujų suslėgimo procesą, vykstantį kompresoriaus darbo ertmėje; linija *2–3* vaizduoja iš kompresoriaus ištekančių dujų aušinimą. Šis procesas vyksta kompresoriaus aušintuve.

Pagal apibrėžimą entropė $dS = dQ/T$. Tada, vykstant procesams *1–2* ir *2–3*,

$$Q_{1-2} = \int_1^2 T \cdot dS; \qquad Q_{2-3} = \int_2^3 T \cdot dS;$$

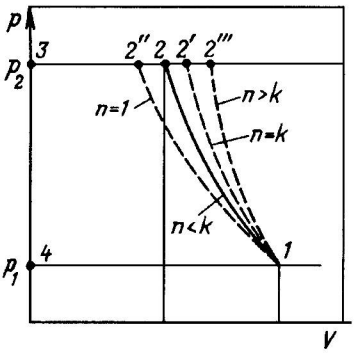
čia Q_{1-2} – suslėgimo metu išsiskyrusi šiluma; Q_{2-3} – aušinimo metu iš dujų paimta šiluma; T – absoliučioji dujų temperatūra, K; S – entropija.

Pointegralinės sandaugos yra elementarūs dujų slėgimo ir aušinimo plotai. Iš čia matyti, kad dujų kompresoriniam procesui atlikti dujoms suteiktas energijos kiekis pateikiamas diagramų *1–2–5–6* ir *2–3–4–5* suma.

Politropiškai suslegiant dujas, kai $n > k$ (9.3 pav., *b*), kas būdinga oru arba vandeniu aušinamiems kompresoriams, plotas *1–2–6–5* vaizduoja dėl trinties ir sūkurių susidarymo sraute išsiskyrusį šilumos kiekį. Kompresoriui tiekiama energija sunaudojama suslėgimo procesui ir sistemos hidrauliniam pasipriešinimui nugalėti. Suslėgimo procesas pavaizduotas plotu *1–2–3–4–5*. Visa kompresoriaus sunaudojama energija pavaizduojama plotu *2–3–4–6*. Jeigu procesas vyktų pagal izoentropę *1–2*, tai suminės energijos sąnaudos būtų lygios plotui *1–2′–3–4–5*, t. y. būtų mažesnės plotu *1–2′–2–6–5*. Iš čia išplaukia, kad kompresoriaus sunaudojamos energijos padidėjimas, pereinant nuo izotropinio prie realaus politropinio, kai $n > k$, susijęs su energijos sąnaudų padidėjimu, kurį atitinka plotas *2′–2–6–5–1*.

Mažiausiai energijos sunaudojama izoterminiam dujų suslėgimui (9.3 pav., *d*). Ši energija vaizduojama plotu *1–2–4–5*.

Kai kada dujų suslėgimo procesą patogu vaizduoti *p–V* diagramoje (9.4 pav.). Paveiksle vientisa linija *1–2* pavaizduotas politropinis suslėgimo procesas, kai $n < k$. Aušinimo procesas *2–3* teoriškai vyksta pagal izobarę $p_2 = const$. Izoterminis suslėgimas pavaizduotas punktyrine linija *1–2″*, izoentropinis – linija *1–2′*, adiabatinis, kai $n > k$, – linija *1–2‴*.



9.4 pav. *p–V* dujų suslėgimo procesų, aprašytų (9.3)...(9.5) lygtimis, diagramos

Energija W, sunaudojama 1 kg dujų suslėgti ir išstumti, pavaizduojama p–V diagramos plotu, apribotu izobarėmis p_1 ir p_2, suslėgimo politrope ir ordinačių ašimi (9.4 pav.), ir, kai $n < k$, apskaičiuojama taip:

$$W = -\int_1^2 p \cdot dv + p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1 .$$

Politropiškai suslegiant, $p \cdot v^n = p_1 \cdot v_1^n$, arba $p = p_1 \cdot v_1^n / v^n$, ir tuomet

$$W_{pol} = -p_1 \cdot v_1 \cdot \int_1^2 dv / v^n + p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1 .$$

Suintegravę gauname:

$$W_{pol} = [n/(n-1)] \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[(p_2/p_1)^{(n-1)/n} - 1 \right]. \qquad (9.7)$$

Ryšys tarp slėgių ir temperatūrų politropinių procesų metu išreiškiamas priklausomybe

$$p_2/p_1 = (T_2/T_1)^{n/(n-1)}. \qquad (9.8)$$

Tada

$$W_{pol} = [n/(n-1)] \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot [(T_2/T_1) - 1]. \qquad (9.9)$$

Įvertinus dujų būsenos lygtį pradinėmis sąlygomis (prieš suslėgimą) $p_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1$, gaunama:

$$W_{pol} = [n/(n-1)] \cdot R \cdot (T_2 - T_1). \qquad (9.10)$$

Politropinio ir izoentropinio procesų lygtys skiriasi tik laipsnio rodiklio vertėmis. Todėl izoentropinį procesą galima aprašyti tokiomis lygtimis:

$$W_{iz} = [k/(k-1)] \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1\right], \quad (9.11)$$

$$p_2/p_1 = (T_2/T_1)^{k/(k-1)}, \quad (9.12)$$

$$W_{iz} = [k/(k-1)] \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot [T_2/T_1 - 1], \quad (9.13)$$

$$W_{iz} = [k/(k-1)] \cdot R \cdot (T_2 - T_1). \quad (9.14)$$

Į šias lygtis įrašę priklausomybes $R = c_p - c_V$ ir $k = c_p/c_V$, jas pertvarkome į lygtį, išreiškiančią izoentropinio suslėgimo darbą per dujų entalpijas prieš suslėgimą ir suslėgus:

$$W_{iz} = c_p \cdot (T_2 - T_1) = I_2 - I_1. \quad (9.15)$$

Kai procesas izoterminis, iš p–V diagramos turime: $p \cdot v = p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2$. Tada $W_{iz} = -\int_1^2 p \cdot dv + p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1 = -\int_1^2 p \cdot dv$.

Kadangi $p = p_1 \cdot v_1/v$, gauname:

$$W_{iz} = -\int_1^2 p_1 \cdot v_1 \cdot dv/v \text{ arba } W_{iz} = p_1 \cdot v_1 \cdot ln(p_2/p_1). \quad (9.16)$$

Dujoms suslėgti reikalinga energija sunaudojama jų entalpijai ir kinetinei energijai pakeisti, taip pat šilumos nuostoliams į aplinką kompensuoti. Ši sąlyga pačia bendriausia forma, kai į kompresorių įtekančių ir iš jo ištekančių dujų srautų greičiai yra vienodi, gali būti užrašyta kaip kompresorinio proceso energijos balanso lygtis:

$$h_1 + W = h_2 \pm q \text{ arba } W \pm q = h_2 - h_1; \quad (9.17)$$

čia h_1 ir h_2 – į kompresorių tiekiamų ir iš jo ištekančių dujų entalpija, J/kg; q – dujų gauta šiluma arba kompresorių aušinant į aplinką pašalinama šiluma, J/kg.

Esant pastoviai temperatūrai, izotermiškai slegiamų dujų vidinė energija nesikeičia ir galioja lygybė $p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2$, gauta iš (9.5) lygties. Tokiomis sąlygomis dujų entalpija nesikeičia, todėl (9.16) lygtis užrašoma taip:

$$W + q = 0 \text{ arba } W - q = 0. \quad (9.17a)$$

Minuso ženklas rodo, kad šiluma šalinama, t. y. visas izoterminio slėgimo metu atliktas darbas virsta šiluma ir ji pašalinama. Todėl dujų temperatūra,

vidinė energija ir entalpija nesikeičia. Tai rodo, jog izoterminio slėgimo metu kompresorių reikia aušinti, kad būtų pašalinta šiluma, lygi atliktam darbui.

Adiabatiškai slegiant dujas, šiluma joms nesuteikiama ir iš jų nepaimama, t. y. $q = 0$. Tada

$$W = h_2 - h_1, \tag{9.17b}$$

t. y. visas slėgimo darbas sunaudojamas dujų entalpijai padidinti, todėl padidėja ir dujų temperatūra.

Teorinė galia N_T, W. Kompresoriuose slegiant dujas sunaudojama galia, lygi kompresoriaus našumo $\rho \cdot V_s$, kg/s, ir savitojo slėgimo darbo L, J/kg, sandaugai. Ji vadinama teorine galia:

$$N_T = \rho \cdot V_s \cdot L. \tag{9.18}$$

Kompresoriaus velenui suteikiama galia apskaičiuojamas pagal lygtį

$$N_e = \rho \cdot V_s \cdot L/(\eta_V \cdot \eta_{mech}); \tag{9.19}$$

čia ρ – į kompresorių tiekiamų dujų tankis, kg/m^3; V_s – kompresoriaus našumas, m^3/s; L – slėgimo proceso savitosios energijos sąnaudos, J/kg; η_V – tūrio naudingumo koeficientas, įvertinantis dujų ištekėjimą pro sandarinimo mazgų plyšius; η_{mech} – mechaninis kompresoriaus naudingumo koeficientas, įvertinantis energijos nuostolius dėl mechaninės trinties.

Dėl galios nuostolių pačiame variklyje ir pavaroje *variklio galia* N_v yra didesnė už galią, kurią reikia suteikti kompresoriaus velenui:

$$N_v = N_e/(\eta_v \cdot \eta_p); \tag{9.20}$$

čia η_p ir η_v – pavaros ir variklio naudingumo koeficientai.

Įrengtoji variklio galia N_{ir} yra 10...15 % didesnė už varikliui reikalingą galią, t. y. $N_{ir} = (1{,}1...1{,}15) \cdot N_v$.

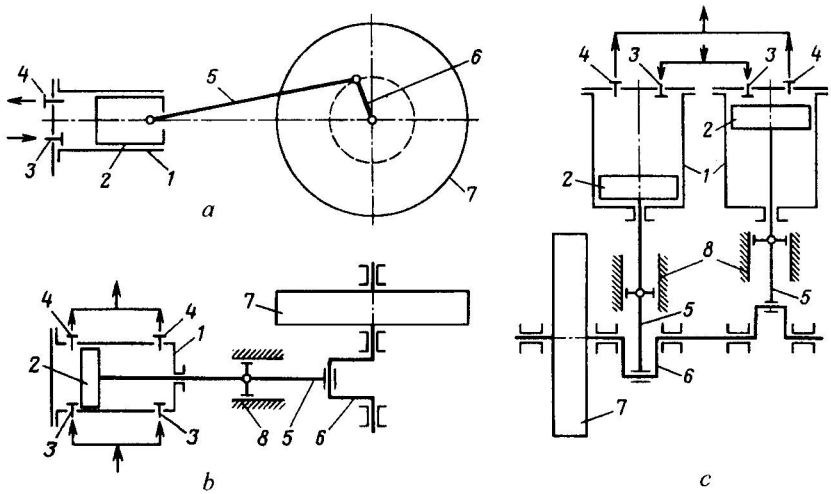
Pagal (9.19) lygtį skaičiuojant kompresoriaus velenui suteikiamą galią, savitosios energijos sąnaudos dujoms suslėgti apskaičiuojamos pagal (9.7), (9.9), (9.11), (9.13), (9.14) arba (9.16) lygtį, nelygu kurio tipo termodinaminiam procesui kompresoriuje slegiamos dujos.

9.2. Tūrinės kompresorinės mašinos

Iš šios grupės kompresorių plačiausiai yra paplitę stūmokliniai ir rotoriniai kompresoriai. Tokiuose kompresoriuose darbas atliekamas įsiurbiant ir išstumiant dujas cilindruose arba specialios formos korpusuose judančiais stūmokliais, plokštelėmis, danteliais.

9.2.1. Stūmokliniai kompresoriai

Stūmokliniai kompresoriai (9.5 pav.) veikia panašiai kaip stūmokliniai siurbliai. Juos galima klasifikuoti pagal: 1) veikimo pobūdį (viengubieji ir dvigubieji); 2) suslėgimo laipsnį (vienpakopiai, dvipakopiai ir daugiapakopiai); 3) cilindrų padėtį (horizontalieji ir vertikalieji); 4) aušinimo būdą (aušinami vandeniu arba oru); 5) sudaromą slėgį (mažo slėgio, kai p_2 = *0,3...1* MPa; vidutinio slėgio, kai p_2 = *1...8* MPa; didelio slėgio, kai p_2 > *8* MPa).



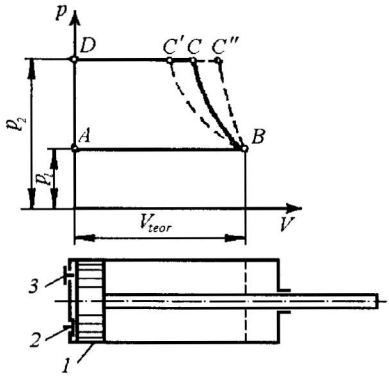
9.5 pav. Stūmoklinių kompresorių schemos:
a – vieno cilindro viengubojo, *b* – vieno cilindro dvigubojo, *c* – dviejų cilindrų viengubojo; *1* – cilindras, *2* – stūmoklis, *3* – siurbimo vožtuvas, *4* – slėgimo vožtuvas, *5* – švaistiklis, *6* – skriejikas, *7* – smagratis, *8* – kryžgalvė

Panagrinėsime *vienpakopio* idealaus kompresoriaus veikimą ir teorinę *p–V* diagramą (9.6 pav.). Per vieną dvigubą stūmoklio eigą (pirmyn – atgal) viengubuosiuose kompresoriuose dujos vieną kartą įsiurbiamos ir vieną kartą išmetamos, o dvigubuosiuose kompresoriuose – du kartus įsiurbiamos ir du kartus išmetamos.

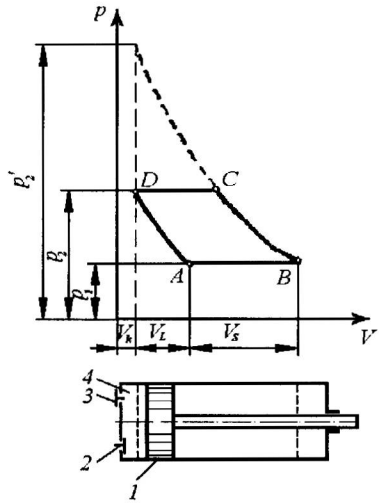
Vienpakopiai kompresoriai gaminami horizontalūs ir vertikalūs. Horizontalieji kompresoriai dažniausiai būna dvigubieji, o vertikalieji – viengubieji.

Dujos (slėgio p_1) į cilindrą pradedamos siurbti stūmokliui *2* pradėjus judėti į dešinę. Stūmokliui pasiekus dešiniąją kraštinę padėtį, būna įsiurbtas teorinis dujų tūris V_{teor}. Šį procesą vaizduoja linija *AB* (9.6 pav.). Grįžtant stūmokliui atgal, siurbimo vožtuvas *3* užsidaro ir dujos suslegiamos iki tokio

slėgio, koks yra slėgimo vamzdyje (p_2). Izoterminį slėgimą vaizduoja linija *BC″*, adiabatinį – linija *BC*, o politropinį – linija *BC′*. Pasiekus reikiamą slėgį, atidaromas slėgimo linijos vožtuvas *4* ir suslėgtos dujos išstumiamos į slėgimo vamzdį. Dujų išstūmimo procesą vaizduoja linija *CD*. Toliau visi procesai kartojasi iš naujo.



9.6 pav. Idealaus kompresoriaus *p–V* diagrama:
1 – stūmoklis, *2* – siurbimo linijos vožtuvas, *3* – slėgimo linijos vožtuvas



9.7 pav. Realaus kompresoriaus *p–V* diagrama:
1 – stūmoklis, *2* – siurbimo linijos vožtuvas, *3* – slėgimo linijos vožtuvas, *4* – kenksmingasis tūris

Vienpakopiame dvigubo veikimo kompresoriuje (9.5 pav., *b*) yra du siurbimo vožtuvai *3* ir du slėgimo vožtuvai *4*. Jų konstrukcija sudėtingesnė, tačiau našumas beveik dvigubai didesnis negu viengubųjų kompresorių.

Slegiamų dujų temperatūrai pažeminti kompresoriaus cilindrui, o kartais ir jo dangteliui įtaisomi vandens gaubtai.

Našumui padidinti gaminami kelių cilindrų kompresoriai. Tokio dviejų cilindrų kompresoriaus schema pavaizduota 9.5 pav., *c*. Tai lyg du viengubieji kompresoriai (9.5 pav., *a*), prijungti prie bendro alkūninio veleno, prie kurio 90 arba 180° kampu yra pritvirtinti skriejikai.

Vertikalieji vienpakopiai kompresoriai, palyginti su tokiais pat horizontaliaisiais, yra našesni, nes jų stūmokliai juda didesniu greičiu, jie užima mažiau ploto, lėčiau dėvisi cilindras ir stūmoklis. Horizontaliuosiuose kompresoriuose, statmenai cilindro judėjimui veikiant sunkio jėgai, viena cilindro ir stūmoklio pusė išsidėvi greičiau.

Realių kompresorių (9.7 pav.) stūmoklis *1*, būdamas ribinėje padėtyje prie cilindro dangtelio, jo nesiekia, todėl tarp jų lieka neišstumtų suslėgtų dujų. Šis neišstumtų dujų užimamas tūris vadinamas kenksminguoju V_k. Jo dydis priklauso nuo kompresoriaus konstrukcijos ir sudaro 2,5...6 % viso cilindro tūrio. Stūmokliui judant iš ribinės padėties, likusios suslėgtos dujos politropiškai plečiasi. Šį procesą vaizduoja linija *DA*. Siurbimo vožtuvas atsidaro tik tuomet, kai liktinių dujų slėgis sumažėja iki įsiurbiamų dujų slėgio p_1, o tūris padidėja iki V_L. Kuo daugiau suslėgtos dujos, tuo mažesnis įsiurbiamų dujų tūris V_{is}. Pasiekus slėgį p_2', dujų siurbimas visai nutrūksta.

Diagramos *p–V* plotas *ABCD* vaizduoja politropinio dujų slėgimo darbą. Diagramoje matome, kad mažiausiai darbo reikia, kai dujos slegiamos izotermiškai, o daugiausia – kai adiabatiškai.

Vienpakopio kompresoriaus teorinis našumas V_{st} (m^3/s, pagal siurbiamų dujų parametrus) apskaičiuojamas pagal lygtį

$$V_{st} = F \cdot S \cdot n = 0{,}785 \cdot D^2 \cdot S \cdot n;$$

čia D – stūmoklio skersmuo, m; F – stūmoklio skerspjūvio plotas, m^2; S – stūmoklio eiga, m; n – alkūninio veleno sukimosi dažnis, s^{-1}.

Tikrasis kompresoriaus našumas V_s, m^3/s, yra mažesnis ir apskaičiuojamas taip:

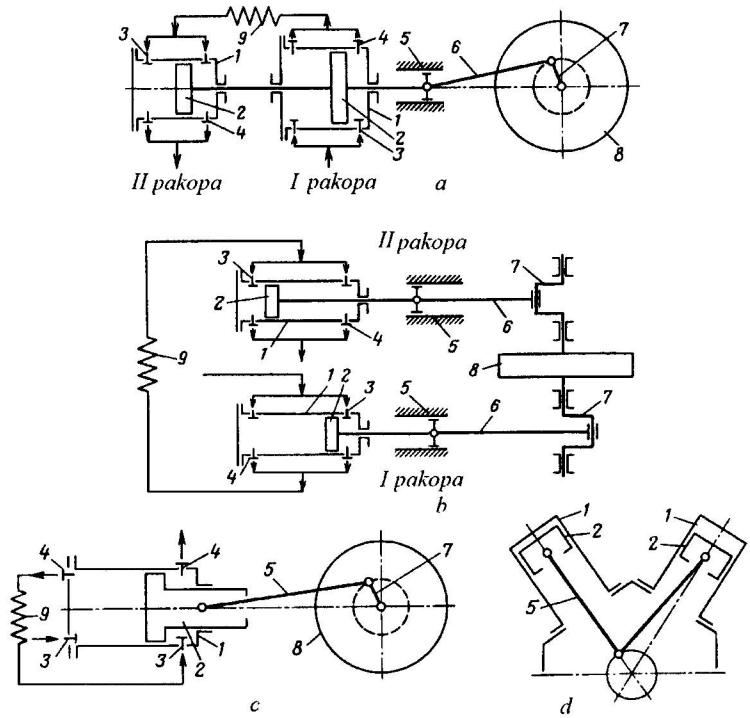
$$V_s = V_{st} \cdot \lambda_v;$$

čia V_{st} – teorinis kompresoriaus našumas, m^3/s; $\lambda_v = \lambda_h \cdot \lambda_0$ – pripildymo koeficientas; λ_h – hermetriškumo koeficientas. Jis įvertina dujų, nutekančių pro stūmoklio sandarinimo žiedus, vožtuvus ir riebokšlius, tūrį ir yra lygus $\lambda_h = 0{,}8...0{,}95$; λ_0 – tūrio naudingumo koeficientas, kuris priklauso nuo kenksmingojo tūrio ir suslėgimo laipsnio. Didinant suslėgimo laipsnį, galima pasiekti, kad tūrio naudingumo koeficientas taptų lygus nuliui. Toks suslėgimo laipsnis vadinamas ribiniu:

$$\lambda_0 = 1 - \frac{V_k}{V_{is}} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]. \quad (9.21)$$

Kompresorius vadinamas nenaudingu, jeigu jo tūrio naudingumo koeficientas mažesnis kaip 0,7. Stūmoklinių kompresorių viename cilindre suslėgimo laipsnis būna nuo 3 iki 4, o mažesnių gali siekti iki 8.

Stūmoklinio kompresoriaus našumas reguliuojamas įvairiais būdais. Patogiausia reguliuoti keičiant variklio sukimosi dažnį, tačiau varikliai dažniausiai būna pastovių apsisukimų, todėl našumas keičiamas reguliuojant į siurbimo liniją tiekiamų suslėgtų dujų kiekį.



9.8 pav. Dvigubųjų stūmoklinių kompresorių schemos:
a – „tandemas“, *b* – „kompaundas“, *c* – su diferenciniu stūmokliu, *d* – su *V* forma išdėstytais cilindrais; *1* – cilindras, *2* – stūmoklis, *3* – siurbimo vožtuvas, *4* – slėgimo vožtuvas, *5* – kryžgalvė, *6* – švaistiklis, *7* – skriejikas, *8* – smagratis, *9* – aušintuvas

Daugiapakopis dujų slėgimas taikomas tuomet, kai reikia pasiekti suslėgimo laipsnį, didesnį už leistiną ribinį vieno cilindro kompresoriams. Tokiuose kompresoriuose dujos iš vieno cilindro į kitą transportuojamos per aušintuvą. Kiekvieno aukštesnio suslėgimo laipsnio cilindro tūris yra mažesnis už tūrį cilindro, kurio suslėgimo laipsnis yra mažesnis.

Dviejų pakopų horizontalieji kompresoriai dažniausiai gaminami vieno cilindro su laiptuotu (arba diferenciniu) stūmokliu (9.8 pav., *c*). Iš aplinkos įsiurbtos dujos cilindro *1* dalyje, esančioje kairėje stūmoklio *2* pusėje, suslegiamos iki tarpinio slėgio p_t, o paskui transportuojamos per aušintuvą *9* į kitoje stūmoklio pusėje esančią cilindro dalį, kurioje suslegiamos iki pasirinkto slėgio p_2.

Daugiapakopiai kompresoriai gaminami su nuosekliai ant vienos ašies išdėstytais cilindrais – sistemos tandemas (9.8 pav., *a*), su lygiagrečiai išdėsty-

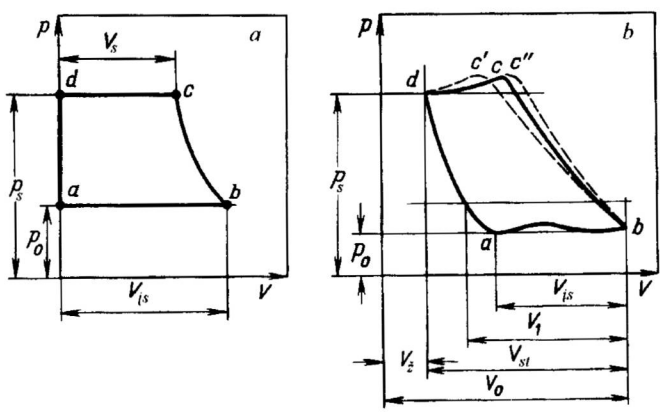
tais cilindrais – sistemos kompaundas (9.8 pav., *b*) arba su *V* forma išdėstytais cilindrais (9.8 pav., *d*).

Pastaruoju metu paplito opoziciniai kompresoriai su priešpriešiais judančiais stūmokliais. Šiuose kompresoriuose cilindrai išdėstyti abiejose alkūninio veleno pusėse. Opoziciniuose kompresoriuose veleno sukimosi greitį galima padidinti nuo 2 iki 2,5 karto, todėl padidėja kompresoriaus našumas.

Dujų tiekimo ir slėgio pulsacijai sumažinti ir tepalams bei drėgmei iš jų pašalinti suslėgtos dujos iš kompresorių tiekiamos į resiverius, o iš jų – vartotojui.

Indikatorinės diagramos. Bandant kompresorius, kaip ir stūmoklinius siurblius, sudaroma indikatorinė diagrama, kuri parodo ryšį tarp vieno alkūninio veleno apsisukimo metu siurbiamų ir slegiamų dujų slėgio *p* ir tūrio *V*.

9.9 pav., *a*, pavaizduota vienpakopio viengubo veikimo kompresoriaus teorinė *p–V* diagrama. Teorinio kompresoriaus stūmoklis ribinėje padėtyje, atitinkančioje diagramos taškus *b* ir *d*, prisiglaudžia prie cilindro dangtelio ir kitas dujų siurbimo ciklas prasideda pasibaigus slėgimui. Dujų siurbimą vaizduoja linija *ab*, slėgimą – linija *bc* , išstūmimą – linija *cd*.



9.9 pav. Vienpakopio viengubo veikimo kompresoriaus indikatorinės *p–V* diagramos: *a* – teorinė, *b* – reali

Realiame kompresoriuje vykstantis procesas (9.9 pav., *b*) iš esmės skiriasi nuo teorinio. Kaip buvo minėta anksčiau, ribinėje padėtyje tarp cilindro dangtelio ir stūmoklio visada pasilieka tarpas, sudarantis laisvą tūrį, arba vadinamąją kenksmingą erdvę. Šioje erdvėje, išstūmus suslėgtas dujas į slėgimo liniją, pasilieka slėgio p_2 dujų, kurios plečiasi stūmokliui judant į priešingą negu slegiant pusę ir siurbimo vožtuvas atsidaro tik dujoms pasiekus siurbimo slėgį p_0. Stūmoklis dalį kelio iki taško *a* juda tuščiai, todėl sumažėja kompre-

soriaus našumas. Kenksmingas tūris išreiškiamas cilindro darbo tūrio dalimis $\varepsilon \cdot V_{ts}$ (ε – kenksmingos erdvės tūrio santykis su stūmoklio aprašomu tūriu V_{ts}). Diagramoje (9.9 pav., *b*) šis tūris pažymėtas $V_{ž}$.

Linijos *bc'* ir *bc"* (9.9 pav., *b*) vaizduoja dujų izoterminį ir adiabatinį suslėgimą. Kadangi diagramos plotas išreiškia dujų slėgimo metu atliktą darbą, iš jos matyti, kad mažiausiai darbo sunaudojama dujas slegiant izotermiškai, o daugiausiai – adiabatiškai. Realiuose kompresoriuose dujos dažniausiai suslegiamos pagal politropę *bc*, kuri atspindi iš dalies aušinamą procesą.

Kompresoriaus našumas priklauso nuo per vieną stūmoklio eigą įsiurbiamo dujų tūrio $V_{įs}$. Dėl kenksmingos erdvės buvimo realus kompresoriaus našumas esti mažesnis už teorinį. Našumo sumažėjimas įvertinamas kompresoriaus tūriniu naudingumo koeficientu λ_0, kuris išreiškiamas santykiu

$$\lambda_0 = V_{įs} / V_{ts} . \qquad (9.21a)$$

Viso cilindro tūrio V_0 ($V_0 = V_{ts} + \varepsilon \cdot V_{ts}$) bei faktiškai įsiurbto dujų tūrio $V_{įs}$ ($V_{įs} = \lambda \cdot V_{ts}$) skirtumo ir stūmoklio aprašomo tūrio V_{ts} santykį pažymime raide x. Tada $x = (V_0 - V_{įs})/V_{ts} = (V_{ts} + \varepsilon \cdot V_{ts} - \lambda_0 \cdot V_{ts})/V_{ts} = 1 + \varepsilon - \lambda_0$.

Iš čia $\lambda_0 = 1 + \varepsilon - x$. (9. 22)

Žinodami, kad kenksmingoje erdvėje esančios dujos plečiasi politropiškai, į (9.3) lygtį įrašę apskaičiuotus dydžius, gauname:

$$p_2 \cdot (\varepsilon \cdot V_{ts})^n = p_1 \cdot (V_0 - V_{įs})^n = p_1 \cdot (x \cdot V_{ts})^n ;$$

čia $x \cdot V_{ts} = V_0 - V_{įs}$ – kenksmingame tūryje likusių išsiplėtusių dujų užimtas tūris, kai jų slėgis sumažėja nuo p_2 iki p_1.

Pertvarkę šią lygtį, gauname:

$$x = \varepsilon \cdot (p_2 / p_1)^{1/n} .$$

Įrašę gautą išraišką į (9.22) lygtį, gauname:

$$\lambda_0 = 1 - \varepsilon \cdot \left[(p_2 / p_1)^{1/n} - 1 \right]. \qquad (9.23)$$

(9.23) lygtis rodo, kad λ_0 vertė priklauso nuo ε, suslėgimo laipsnio p_2/p_1 ir plėtimosi politropės rodiklio n, t. y. nuo kompresoriaus konstrukcijos ir slegiamų dujų savybių.

Didėjant suslėgimo laipsniui, tūrinis koeficientas λ_0 mažėja ir gali tapti lygus nuliui. Suslėgimo laipsnis, kuriam esant $\lambda_0 = 0$, vadinamas suslėgimo riba. Tokiu atveju kenksmingoje erdvėje esančios dujos išsiplėtusios (iki siur-

bimo slėgio p_0) užima visą cilindro tūrį ir naujų dujų neįsiurbiama, kompresoriaus našumas tampa lygus nuliui.

Kompresoriaus našumas priklauso ne tik nuo (9.22) lygtyje nurodytų dydžių, bet jis sumažėja ir dujoms ištekant pro vožtuvų nesandarumus bei šylant siurbiamoms dujoms, kai jos susiliečia su šiltomis cilindro sienelėmis (dujų temperatūrai didėjant, jų savitasis tūris taip pat didėja). Todėl skaičiuojant kompresoriaus našumą, nuostoliams įvertinti vartojamas tiekimo koeficientas λ_V. Tiekimo koeficientu laikomas kompresoriaus tiekiamų dujų tūrio (perskaičiuoto įsiurbimo sąlygoms) ir stūmoklio aprašomo tūrio tarpusavio santykis. Jis įvertina visų rūšių tūrio nuostolius. Tiekimo koeficientas λ_V gali būti išreikštas sandauga tūrio koeficiento λ_0 ir koeficiento λ_l, įvertinančio dujų nuostolius pro nesandarumus ir dėl jų sušilimo įtekant į cilindrą:

$$\lambda_V = \lambda_0 \cdot \lambda_l . \tag{9.24}$$

Apytikslę λ_V vertę galima apskaičiuoti pagal lygtį

$$\lambda_V = \lambda_0 \cdot (1{,}01...1{,}02 \cdot p_2 / p_1). \tag{9.25}$$

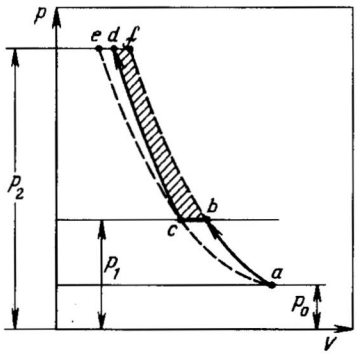
Tada daugiapakopių kompresorių faktinis našumas V_s, m^3/s, apskaičiuojamas pagal lygtį

$$V_s = \lambda_V \cdot z \cdot F \cdot S \cdot n ; \tag{9.26}$$

čia z – įsiurbimų per vieną stūmoklio eigą skaičius (pvz., dvigubųjų kompresorių $z = 2$); F – stūmoklio skerspjūvio plotas, m^2; S – stūmoklio eiga, m; n – kompresoriaus veleno apsisukimų skaičius, s^{-1}.

Kai dujų slėgis turi būti didesnis kaip 0,5...0,7 MPa, naudojami daugiapakopiai kompresoriai. Jie dirba efektyviau, mažiau kyla dujų temperatūra.

Panagrinėsime šiuos procesus teorinėje p–V diagramoje (9.10 pav.). Nuo p_0 iki p_1 dviejų pokopų kompresoriaus pirmojoje pakopoje dažniausiai slegiama pagal adiabatę *ab*, toliau suslėgtos dujos aušinamos pasroviniame aušintuve iki pradinės temperatūros (tiesė *bc*), esančios ant izotermės *ace*. Antrojoje pakopoje dujos pagal adiabatę *cd* slegiamos iki galutinio slėgio p_2. Todėl dviejų pakopų suslėgimas, esant tarpiniam dujų aušinimui (pagal laužtinę *abcd*), yra artimesnis izotermei negu adiabatei *abf*, kuri apibūdina dujų suslėgimą iki tokio pat slėgio p_2 vienos pakopos kompresoriuje. Užbrūkšniuotas plotas *bcdf* rodo energijos kiekį, sutaupytą slegiant dujas dviejų pakopų kompresoriuje, lyginant su slėgimu vienos pakopos kompresoriuje. Todėl didinant pakopų skaičių suslėgimo procesas artėja prie izoterminio, bet tokio kompresoriaus konstrukcija sudėtingesnė. Rekomenduojamas kompresorių pakopų skaičius – ne daugiau kaip 6 arba 7.



9.10 pav. Teorinė daugiapakopio dujų suslėgimo kompresoriuje p–V diagrama

Ekonomiškiausiai daugiapakopiai kompresoriai veikia tada, kai visose pakopose pasiekiamas vienodas suslėgimo laipsnis c. Kai bendras suslėgimų (slėgimų pakopų) skaičius m, tada kiekvienoje pakopoje pasiekiamas suslėgimo laipsnis apskaičiuojamas taip:

$$c = \left(p_g / p_l\right)^{1/m}. \qquad (9.27)$$

Kadangi tarp kompresoriaus pakopų atsiranda slėgio nuostolių, tai suslėgimo laipsnis kiekvienoje suslėgimo pakopoje turi būti didesnis už apskaičiuotą pagal lygtį

$$c = \varphi \cdot \left(p_g / p_l\right)^{1/m}; \qquad (9.28)$$

čia $\varphi = 1{,}15...1{,}5$ – slėgio nuostolius tarp kompresoriaus pakopų įvertinantis koeficientas; p_g – didžiausias sudaromas slėgis.

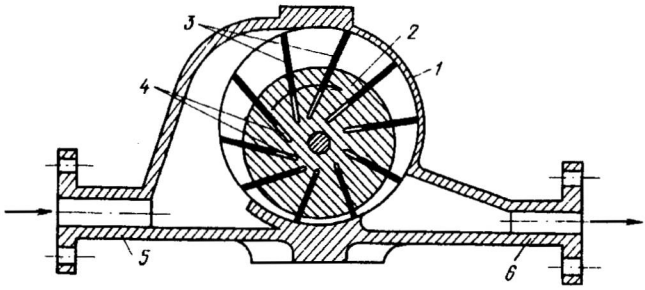
Stūmokliniai kompresoriai, kaip ir kitos stūmoklinės mašinos, yra masyvūs ir triukšmingai veikia, tačiau nelabai našių ir pakankamai didelį dujų slėgį sudarančių išcentrinių kompresorių gamyba gana sudėtinga. Transportuojant 3000...6000 m^3/h dujų, kurių slėgis didesnis kaip 0,5 MPa, paprastai naudojami stūmokliniai kompresoriai, dažniausiai vertikalieji, nes jie spartesni, kompaktiškesni, jų naudingumo koeficientas didesnis negu horizontaliųjų.

9.2.2. Rotacinės kompresorinės mašinos

Pagal sudaromą slėgį šios mašinos skirstomos į dujopūtes ($p < 0{,}3$ MPa) ir kompresorius ($p = 3...15$ MPa), o pagal veikimo principą jos yra panašios į rotacinius siurblius (8.15 pav.).

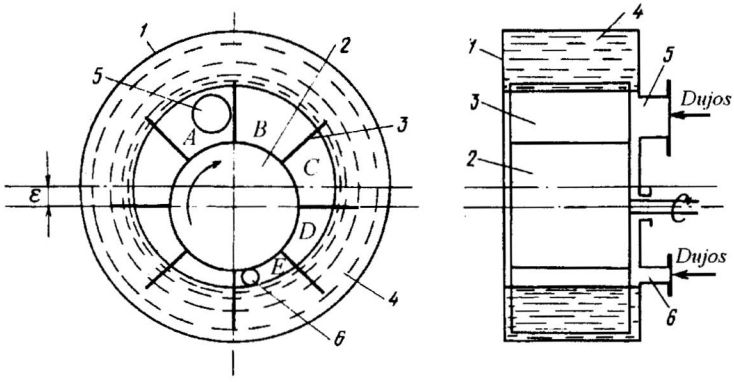
Rotacinis-plokštelinis kompresorius (9.11 pav.). Sukantis masyviam rotoriui *2*, jo išilginėse įpjovose *4* laisvai juda plokštelės *3*. Dujos iš siurbimo at-

vamzdžio *5* patenka į ertmes tarp plokštelių ir transportuojamos į slėgimo atvamzdį *6*. Rotacinio kompresoriaus velenas prie elektros variklio jungiamas ne per reduktorių, o tiesiogiai. Tai aparatą daro kompaktiškesnį, sumažėja jo masė.



9.11 pav. Rotacinis-plokštelinis kompresorius: *1* – korpusas, *2* – rotorius, *3* – plokštelės, *4* – įpjovos, *5* – siurbimo atvamzdis, *6* – slėgimo atvamzdis

Vandens žiedo rotacinės dujopūtės (9.12 pav.) korpuse ekscentriškai įtvirtinamas rotorius *2* su mentėmis *3*. Prieš paleidžiant dujopūtę, pusė vidinio jos korpuso tūrio pripildoma vandens. Dujopūtės darbo metu apie besisukantį rotorių *2* dėl išcentrinių jėgų susidaro vandens žiedas *4*. Apačioje esančios mentės būna apsemtos vandens, o viršutinių tik galai panirę į vandenį. Rotoriui sukantis pagal laikrodžio rodyklę ir mentėms leidžiantis žemyn, vandens žiedas artėja prie ašies.



9.12 pav. Vandens žiedo rotacinė dujopūtė:
1 – cilindrinis korpusas, *2* – rotorius, *3* – mentelės, *4* – skysčio žiedas, *5* ir *6* – dujų siurbimo ir slėgimo atvamzdžiai

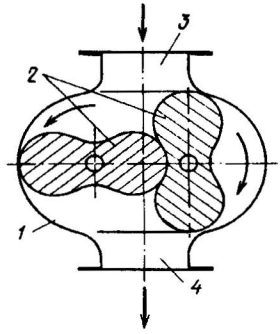
Tuo metu pro korpuso šone esantį atvamzdį *5* į pjautuvo formos tarpmentinę ertmę siurbiamos dujos. Sukantis rotoriui, vandens žiedas išstumia dujas pro atvamzdį *6*. Vanduo (skystis) šio tipo dujopūtėse veikia kaip stūmoklis, kadangi dėl vandens žiedo keičiasi tarpmentinės ertmės tūris (mažėja, kaip parodyta brėžinyje padėtyse *A, B, C, D, E*).

Rotacinės kompresorinės mašinos dažniausiai būna dviejų pakopų. Kuo daugiau jų rotoriuje yra plokštelių arba mentelių, tuo tolygiau transportuojamos dujos.

Rotacinėmis-kumštinėmis dujopūtėmis (9.13 pav.) dujos pučiamos ne taip tolygiai kaip išcentrinėmis arba ašinėmis kompresorinėmis mašinomis. Jų našumas apskaičiuojamas pagal apytikslę lygtį:

$$V_S = D^2 \cdot b \cdot n \cdot \eta \; ; \qquad (9.29)$$

čia V_s – dujopūtės našumas, m^3/s; b – kumščio storis, m; D – kumščio brėžiamo išorinio apskritimo skersmuo, m; n – kumščio sukimosi dažnis, s^{-1}; η – tūrio naudingumo koeficientas (0,7...0,8).



9.13 pav. Rotacinė-kumštinė dujopūtė:
1 – korpusas, *2* – rotoriai, *3* ir *4* – siurbimo ir slėgimo atvamzdžiai

Ant dviejų lygiagrečių velenų korpuse *1* sukasi du rotoriai *2*. Vienas iš jų sukamas elektros variklio, antrasis su pirmuoju jungiasi per pavarą, kurios perdavimo skaičius lygus vienetui. Rotoriai glotniai glaudžiasi vienas prie kito ir korpuso vidinio paviršiaus, todėl susidaro dvi atskiros ertmės. Į vieną iš jų pro atvamzdį *3* siurbiamos dujos, kitoje jos suslegiamos ir pro atvamzdį *4* patenka į slėgimo vamzdį.

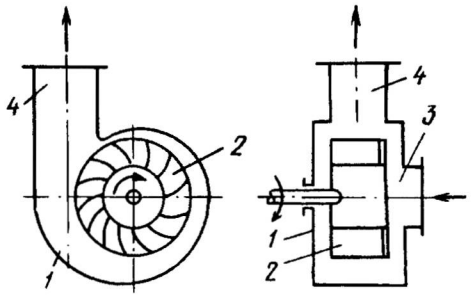
Rotorinių kompresorių našumas 5000...6000 m^3/h, jie sudaro iki 1,0 MPa perteklinį slėgį. Šiuos kompresorius keblu gaminti ir eksploatuoti, jie dirba triukšmingai, gana greitai susidėvi rotoriaus plokštelės.

9.3. Dinaminės kompresorinės mašinos

Prie dinaminių kompresorinių mašinų priskiriamos išcentrinės, ašinės ir čiurkšlinės kompresorinės mašinos. Jų veikimo principas toks pat kaip atitinkamų siurblių.

Prie **išcentrinių kompresorinių mašinų** priskiriami išcentriniai ventiliatoriai, turbininės dujopūtės ir turbokompresoriai.

Išcentriniai ventiliatoriai pagal sudaromą perteklinį slėgį skirstomi į: 1) mažo slėgio ($p_2 < 1$ kPa); 2) vidutinio slėgio ($p_2 = 1...3$ kPa) ir 3) didelio slėgio ($p_2 = 3...10$ kPa).



9.14 pav. Išcentrinis ventiliatorius:
1 – korpusas, *2* – rotorius su mentėmis, *3* – slėgimo atvamzdis, *4* – siurbimo atvamzdis

Išcentrinis ventiliatorius (9.14 pav.) sudarytas iš spiralinio korpuso *1*, kuriame įtaisytas variklio sukamas rotorius *2*, turintis daug mentelių. Į ventiliatorių dujos įsiurbiamos ašies kryptimi pro siurbimo atvamzdį *3*, o išmetamos rotoriaus liestinės kryptimi pro slėgimo atvamzdį *4*.

Ventiliatoriaus sukimosi dažnio n įtaka jo našumui V_s, sudaromo slėgio aukščiui H ir galiai N išreiškiama (8.23), (8.24) ir (8.25) lygtimis. Išcentrinio ventiliatoriaus darbo charakteristikos panašios į 8.24 paveiksle pavaizduotas išcentrinio siurblio charakteristikas.

Ventiliatoriaus sudaromas slėgis p, Pa, apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$p = (p_2 - p_1) + \Delta p_s + \Delta p_{sl} + \frac{w^2 \cdot \rho}{2}; \qquad (9.30)$$

čia p_1 – slėgis ertmėje, iš kurios ventiliatorius siurbia dujas, Pa; p_2 – slėgis ertmėje, į kurią ventiliatorius tiekia dujas, Pa; Δp_s – slėgio nuostoliai siurbimo vamzdyje, Pa; Δp_{sl} – slėgio nuostoliai slėgimo vamzdyje, Pa; $(w^2 \cdot \rho)/2$ – slėgio nuostoliai, atsirandantys dėl dujų greičio, Pa.

Ventiliatoriui reikalinga galia N apskaičiuojama pagal lygtį

$$N = \frac{V_S \cdot p}{1000 \cdot \eta}; \qquad (9.31)$$

čia N – ventiliatoriaus galia, kW; V_s – ventiliatoriaus našumas, m^3/s; p – ventiliatoriaus sudaromas slėgis, Pa; η – ventiliatoriaus naudingumo koeficientas.

Mažo ir vidutinio slėgio ventiliatorių rotorių plotis yra daug didesnis už tokio pat skersmens didelio slėgio ventiliatorių rotorių plotį, todėl didesnis ir jų našumas. Apskritiminį greitį riboja rotoriaus atsparumas. Didinant skersmenį, mažėja rotoriaus atsparumas, todėl reikia mažinti apskritiminį greitį. Tačiau, mažinant apskritiminį greitį, mažėja ir sudaromas slėgis.

Analizuodami 8.22 paveikslą ir (8.20) lygtis, matome, kad padidinti sudaromą slėgį galima didinant *rotoriaus menčių lenkimo kampą* α, bet tada padidėja hidrauliniai nuostoliai. Išnagrinėjus rotoriaus menčių išlenkimo teigiamybes ir trūkumus, mažo ir vidutinio slėgio ventiliatorių mentės dažniausiai gaminamos palinkusios į priekį (kampas $\alpha_2 = 120...150°$). Didelio slėgio ventiliatorių menčių taip išlenkti negalima, nes susidaro dideli hidrauliniai nuostoliai. Jų rotoriaus mentės būna atlenktos atgal (kampas $\alpha_2 < 90°$).

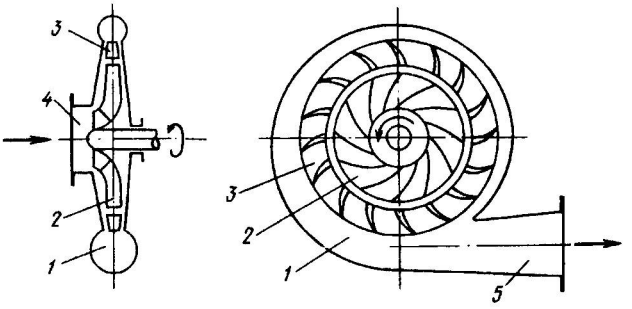
Išcentriniai ventiliatoriai naudojami vietinei patalpų ventiliacijai, dūmtraukių traukai pagerinti, o didelio slėgio ventiliatoriai – dar ir pneumatiniam transportui. Agresyvios dujos transportuojamos specialia apsaugine danga išklotais ventiliatoriais.

Ventiliatoriai gaminami serijomis, kurias sudaro geometriškai panašūs ventiliatoriai. Tos pačios serijos ventiliatoriai skiriasi tik rotoriaus skersmeniu. Ventiliatoriui suteikiamas numeris pagal rotoriaus skersmens dydį, pavyzdžiui, ventiliatoriaus Nr. 5 rotoriaus skersmuo yra 0,5 m.

Turbininės dujopūtės ir turbokompresoriai veikia tuo pačiu principu kaip ir išcentriniai ventiliatoriai. Turbininės dujopūtės būna vienpakopės ir daugiapakopės, o turbokompresoriai – tik daugiapakopiai.

Vienpakopę turbininę dujopūtę (9.15 pav.) galima vadinti didelio slėgio išcentriniu ventiliatoriumi, kuris sudaro iki 30 kPa slėgį. Sukantis rotoriui *2*, pro angą *4* siurbiamos dujos patenka tarp rotoriaus menčių ir įgauna kinetinę energiją. Judėdamos dujos iš rotoriaus *2* patenka į nejudamąjį kreipratį *3*, kuriame dalis kinetinės energijos virsta potencine. Iš kreipračio dujos patenka į slėgimo linijos atvamzdį *5*, o iš jo – į slėgimo liniją.

Daugiapakopės turbininės dujopūtės nuo vienpakopių skiriasi tuo, kad jose, panašiai kaip išcentriniuose siurbliuose (8.21 pav.), ant vieno veleno nuosekliai sujungti trys arba keturi rotoriai. Tokių dujopūčių visų rotorių skersmuo ir sukimosi dažnis būna vienodas, bet jų plotis nuosekliai mažėja, nes mažėja slegiamų dujų tūris. Dujopūtėse pasiekiamas suslėgimo laipsnis 3...3,5, todėl dujų temperatūra padidėja nedaug ir jų aušinti nereikia.

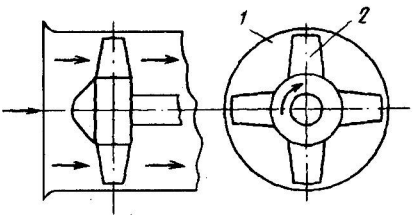


9.15 pav. Vienpakopė turbininė dujopūtė:
1 – korpusas, *2* – rotorius su mentelėmis, *3* – kreipratis,
4 ir *5* – siurbimo ir slėgimo atvamzdžiai

Turbokompresorių veikimo principas toks pat kaip daugiapakopių turbininių dujopūčių, tik jie turi daugiau rotorių. Be to, nuosekliai mažėja ne tik jų rotorių plotis, bet ir skersmuo. Turbokompresoriai sudaro iki 3 MPa slėgį, todėl slegiamos dujos įšyla ir jas reikia aušinti. Dažniausiai aušinama vandeniu paviršiniuose aušintuvuose, kurie statomi po kiekvieno slėgimo laipsnio.

Ašinės kompresorinės mašinos. Šiai kompresorinių mašinų grupei priskiriami ašiniai ventiliatoriai ir ašiniai kompresoriai. Pastarieji dar vadinami ašiniais turbokompresoriais.

Ašinių ventiliatorių (9.16 pav.) cilindriniame korpuse *1* elektros variklio sukamas propelerio formos darbo ratas 2, t. y. įvorė su prie jos pritvirtintomis 4...8 mentėmis. Įvorė užmaunama ant variklio veleno ir prie jo pritvirtinama.



9.16 pav. Ašinis ventiliatorius: *1* – korpusas, *2* – darbo ratas

Ašiniame ventiliatoriuje dujos, slegiamos menčių, juda išilgai ašies. Ventiliatoriai su simetriškomis mentėmis, pakeitus darbo rato sukimosi kryptį, pučia dujas priešinga kryptimi. Tokie ventiliatoriai vadinami reversiniais. Pakeitus sukimosi kryptį, dujas priešinga kryptimi pučia ir nereversiniai ventiliatoriai (rotoriai su nesimetriškomis mentėmis), bet tokiu atveju labai sumažėja jų našumas ir sudaromas slėgis.

Ašinių ventiliatorių darbas labai priklauso nuo tarpelio tarp cilindrinio korpuso ir menčių galų. Jis turi būti ne didesnis kaip 1,5 % mentės ilgio, priešingu atveju sumažėja ventiliatoriaus darbo efektyvumas. Todėl, montuojant ventiliatorių, būtinai reikia patikrinti šį tarpelį.

Ašinių ventiliatorių našumas ir naudingumo koeficientas didesni negu išcentrinių ventiliatorių, bet tris keturis kartus mažesnis jų sudaromas slėgis.

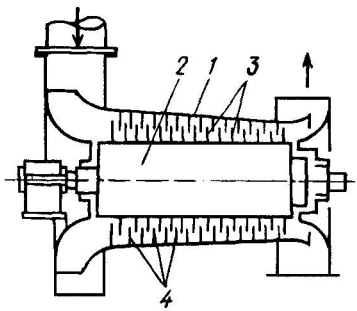
Ašinių ventiliatorių našumas apskaičiuojamas taip:

$$V_s = 0{,}45 \cdot D \cdot n; \qquad (9.32)$$

čia V_s – ašinio ventiliatoriaus našumas, m^3/s; D – darbo rato skersmuo, m; n – sukimosi dažnis, s^{-1}.

Ašiniam ventiliatoriui reikalinga galia apskaičiuojama pagal (9.31) lygtį.

Ašinis kompresorius (9.17 pav.) yra daugiapakopis (10...20 pakopų) ašinis ventiliatorius.



9.17 pav. Ašinis kompresorius:
1 – korpusas, *2* – rotorius su mentelėmis, *3* ir *4* – korpuso nejudamosios mentelės

Korpuse *1* sukasi cilindrinis rotorius *2* su darbo mentelėmis *3*. Šios mentelės sukasi tarp prie korpuso pritvirtintų nejudamųjų mentelių *4* ir dujoms suteikia sraigtinį judesį. Tarpelis tarp mentelių ir korpuso mažas (iki 0,5 mm). Toks kompresorius gali sudaryti iki 0,6 MPa slėgį. Ašinių kompresorių naudingumo koeficientas didesnis negu išcentrinių kompresorių. Juose slegiamos dujos neaušinamos.

9.4. Vakuuminiai siurbliai

Vakuuminiais siurbliais aparatuose sudaromas vakuumas. Pramonėje naudojami įvairių tipų vakuuminiai siurbliai: stūmokliniai, rotaciniai, plokštiniai, vandens žiedo rotaciniai, ežekciniai. Visų jų veikimo principas toks pat kaip analogiško pavadinimo kompresorinių mašinų arba siurblių, naudojamų

skysčiams transportuoti. Vakuuminių siurblių atskirų dalių konstrukcija dažnai skiriasi nuo kompresorinių mašinų dalių konstrukcijos, nes didesnis jų suslėgimo laipsnis. Pavyzdžiui, vakuuminių siurblių, kuriais sudaromas 0,01 MPa vakuumas (atmosferos slėgis ≈ 0,1 MPa), suslėgimo laipsnis siekia $\frac{p_2}{p_1} = \frac{0{,}1 \cdot MPa}{0{,}01 \cdot MPa} = 10.$ Nagrinėdami kompresorines mašinas, matėme, kad vienpakopiai kompresoriai tokio suslėgimo laipsnio nepasiekia.

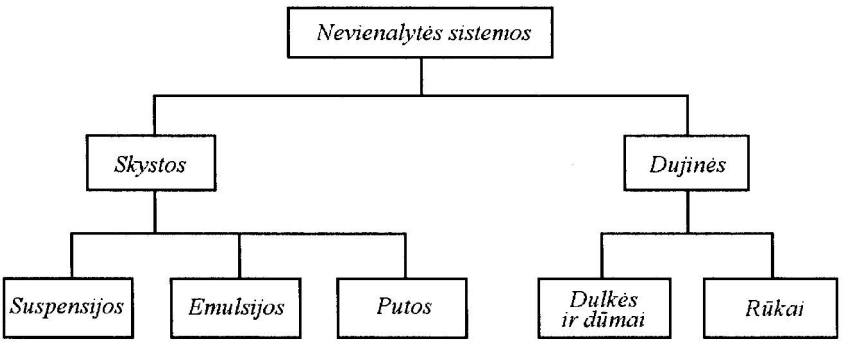
Didėjant vakuumui, mažėja tūrio naudingumo koeficientas ir vakuuminio siurblio našumas. Vakuuminių siurblių naudojamą galią apytiksliai galima apskaičiuoti pagal (9.31) lygtį.

10 DALIS

NEVIENALYČIŲ SISTEMŲ PERSKYRIMAS

10.1. Nevienalyčių sistemų ir jų perskyrimo metodų klasifikavimas

Chemijos pramonėje daugelyje technologinių procesų susidaro nevienalytės sistemos. Nevienalytė, arba heterogeninė, sistema susideda mažiausiai iš dviejų fazių: dispersinės fazės (smulkių dalelių pavidalo) ir terpės (supančios dispersinės fazės daleles). Nevienalyčių sistemų klasifikavimas pagal fazių fizikinę būseną pavaizduotas 10.1 paveiksle.



10.1 pav. Nevienalyčių sistemų klasifikavimas

Suspensija vadinamas skystis, kuriame pakibusios kietos dalelės. Atsižvelgiant į kietųjų dalelių dydį, suspensijos skirstomos į penkias grupes: 1) stambių dalelių suspensija ($d > 1$ mm); 2) vidutinio stambumo dalelių suspensija (nuo 100 μm iki 1 mm); 3) smulkių dalelių suspensija (nuo 5 iki 100 μm); 4) labai smulkių dalelių suspensija (nuo 0,1 iki 5 μm); 5) koloidiniai tirpalai ($d < 0,1$ μm).

Jeigu skystoje terpėje dispersinė fazė yra molekulių, jonų arba atomų dydžio, tai tokia sistema vadinama homogenine (vienalyte arba tikruoju tirpalu). Todėl medžiagų skirstymas į heterogenines ir homogenines sistemas yra lyg ir sąlygiškas.

Emulsija – tai skystis, kuriame yra pakibusių kito terpėje netirpaus skysčio, vadinamo dispersine faze, smulkių lašelių. Dispersinės fazės dalelės būna labai įvairaus dydžio. Patvari būna tokia emulsija, kurios dalelės smulkesnės kaip 0,4...0,5 μm. Kitokia emulsija išsisluoksniuoja.

Putos sudarytos iš skysčio ir dujų burbuliukų.

Dulkėmis ir dūmais vadinamos nevienalytės dujinės sistemos, kurias sudaro dujos ir jose pakibusios kietos arba kietos ir skysčio dalelės. Dulkės susidaro smulkinant, transportuojant arba maišant kietas medžiagas. Dulkių dispersinės fazės dalelės dažniausiai būna nuo 2 iki 100 μm dydžio. Dūmai susidaro vykstant cheminėms reakcijoms arba kondensuojantis ir kietėjant dujoms (garams). Dūmų dispersinių dalelių dydis nuo 0,3 iki 30 μm.

Rūkus sudaro dujos ir jose pakibusios skysčio dalelės. Šios dispersinės dalelės būna nuo 0,3 iki 3 μm dydžio.

Dulkės, dūmai ir rūkai sudaro aerodispersines sistemas, vadinamas *aerozoliais*.

Emulsijoms ir putoms pasiekus tam tikrą nurodytą disperguotos fazės koncentraciją, virsta dispersijos terpe, o buvusi terpė – disperguota faze. Toks perėjimas vadinamas fazių inversija.

Dažniausiai dispersinėse sistemose būna įvairaus dydžio disperguotų dalelių. Tokios sistemos vadinamos polidispersinėmis. Jos apibūdinamos frakcine arba dispersine sudėtimi, t. y. nurodyto dydžio dalelių dalimi nuo bendro disperguotos fazės kiekio. Kai disperguotos dalelės yra labai artimo dydžio, tokios sistemos vadinamos monodispersinėmis.

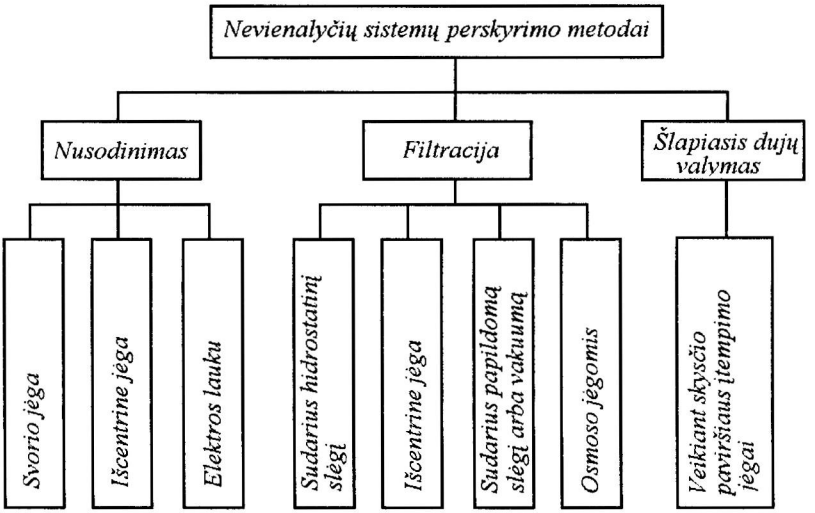
Dauguma dispersinių sistemų yra nestabilios, t. y. jų dalelės turi polinkį stambėti. Lašelių arba burbuliukų stambėjimas, jiems susiliejant, vadinamas koalescencija, o kietų dalelių stambėjimas, joms sulimpant, koaguliacija.

Dažnai nevienalytes sistemas reikia perskirti, pvz., ruošiant technologinių procesų žaliavas, valant produktus, panaudotą technologinį vandenį, į aplinką šalinamas dujas ir kt. Nevienalyčių sistemų perskyrimo metodų klasifikavimas pavaizduotas 10.2 paveiksle.

Nevienalytės sistemos perskyrimo metodas priklauso nuo pakibusių dalelių dydžio, abiejų fazių tankių skirtumo ir visos sistemos klampos. Parenkant perskyrimo aparatus, atsižvelgiama į sistemos temperatūrą, chemines savybes, terpės būseną, aparato perskyrimo kokybę, efektyvumą ir ekonomiškumą.

Prie nusodinimo metodų priskiriamas nusodinimas veikiant sunkio ir išcentrinei jėgai arba elektrostatinei jėgai. Jis gali būti taikomas visoms nevienalytėms sistemoms perskirti. Filtravimas yra skystų arba dujinių sistemų perskyrimas naudojant akytąsias pertvaras. Šlapiuoju dujų valymu perskiriamos

nevienalytės dujinės sistemos. Nusodinimas elektros lauke ir šlapiasis dujų valymas taikomi tik dujinėms nevienalytėms sistemoms, o visi kiti metodai – ir dujinėms, ir skystoms sistemoms perskirti. Nors metodai taikomi tie patys, bet skirtingų atmainų nevienalytėms sistemoms perskirti naudojami ir skirtingos konstrukcijos aparatai.



10.2 pav. Nevienalyčių sistemų perskyrimo metodų klasifikavimas

Osmoso jėgų poveikio metodas vienalytėms sistemoms perskirti nagrinėjamas membraninių procesų skyriuje.

Nevienalyčių sistemų dispersinę fazę dažniausiai sudaro įvairaus dydžio dalelės. Mažesnėms dalelėms atskirti reikia sudėtingesnių aparatų ir sunaudojama daugiau energijos. Perskyrimo kokybė nusakoma išvalymo laipsniu. Jis rodo, kokia dispersinės fazės dalis aparate atskiriama nuo terpės:

$$\eta = \frac{G_{pr} - G_g}{G_{pr}} \cdot 100 \ ; \qquad (10.1)$$

čia η – išvalymo laipsnis, %; G_{pr} – dispersinės fazės kiekis terpėje prieš perskyrimą, kg/m^3; G_g – dispersinės fazės kiekis terpėje po perskyrimo, kg/m^3.

Medžiagų balansas. Tiriant ir projektuojant nevienalyčių sistemų perskyrimo aparatus ar metodus, būna žinomas perskirti tiekiamos nevienalytės sistemos kiekis ir dispersinės fazės koncentracija terpėje prieš perskyrimą arba

po jo, todėl kita koncentracija bei į aparatą tiekiamas dispersinės fazės kiekis apskaičiuojamas pagal medžiagų balanso lygtis.

Pažymime: $G_m, G_{iš}, G_n$ – atitinkamai perskiriamos sistemos (pradinio mišinio), išvalytos dispersijos terpės ir gautų nuosėdų masė (kg) arba masės debitas (kg/s, kg/h); $x_m, x_{iš}, x_n$ – dispersinės fazės koncentracija atitinkamai perskiriamoje sistemoje, išvalytoje terpėje ir nuosėdose, masės dalimis.

Kai proceso metu nesusidaro nuostolių, gali būti užrašomos tokios medžiagų balanso lygtys:

pagal visos medžiagos kiekį:

$$G_m = G_{iš} + G_n, \tag{10.2}$$

pagal dispersinę medžiagą:

$$G_m \cdot x_m = G_{iš} \cdot x_{i.š} + G_n \cdot x_n. \tag{10.3}$$

Jeigu žinomas pradinio mišinio kiekis ir visos koncentracijos, tai išsprendus (10.1) ir (10.2) lygtis, apskaičiuojami nuskaidrėjusios terpės ir gautų nuosėdų kiekiai $G_{iš}$ ir G_n:

$$G_{iš} = G_m \cdot (x_n - x_m)/(x_n - x_{iš})$$

ir $$G_n = G_m \cdot (x_m - x_{iš})/(x_n - x_{iš}). \tag{10.4}$$

Šios lygtys tinka tik nusodinimui ir filtravimui apskaičiuoti arba tirti. Šlapiojo dujų valymo balanso lygtys bus pateiktos atskirai.

Kai kuriais atvejais skaičiavimuose naudojami tūrio debitai V (m^3/s) ir koncentracija tūrio dalimis a (m^3/m^3). Vieniems vienetams perskaičiuoti į kitus pasinaudojama sąlygine heterogeninės sistemos tankio ρ_m sąvoka:

$$\rho_m = a_k \cdot \rho_k + (1 - a_k) \cdot \rho = 1/[x_k/\rho_k + (1 - x_k)/\rho]; \tag{10.5}$$

čia ρ_k – dispersinės fazės tankis, kg/m^3; ρ – dispersijos terpės tankis, kg/m^3; a_k ir x_k – dispersinės fazės koncentracija atitinkamai tūrio ir masės dalimis.

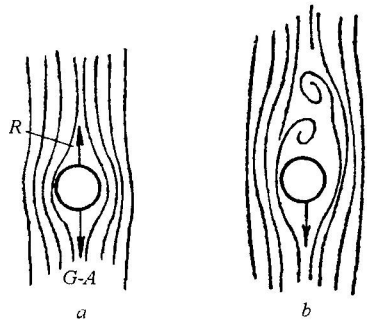
10.2. Nusodinimas

10.2.1. Nusodinimas sunkio jėga

Nusodinimas pramonėje naudojamas suspensijoms sutirštinti ir klasifikuoti pagal kietosios fazės frakcijas, pirminiam dulkių valymui iš dujų ir emulsijoms perskirti. Kadangi varos jėga (sunkio jėga) maža, tai pakankamai efektyviai galima atskirti tik stambias daleles. Nusodinimas yra paprasčiausias ir pigiausias iš hidrodinaminių perskyrimo metodų, todėl jis dažnai taikomas

pirminiam perskyrimui, kad atpigtų sudėtingesni po jo taikomi perskyrimo metodai.

Nusodinimo proceso teorijai aiškinti, panagrinėsime rutulio formos dalelės judėjimą nejudančioje terpėje (10.3 pav.).



10.3 pav. Dalelės judėjimas skystyje:
a – laminarinis, *b* – turbulentinis

Jėgą, kuri verčia daiktą judėti, išreiškiama sunkio (*G*) ir Archimedo (*A*) jėgų skirtumu:

$$G - A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_d - \rho_t); \qquad (10.6)$$

čia $\frac{\pi \cdot d^3}{6}$ – dalelės tūris, m^3; ρ_d ir ρ_t – dalelės ir terpės tankiai, kg/m^3.

Nusodinimo pradžioje dalelė juda greitėdama. Tačiau didėjant greičiui, didėja ir terpės pasipriešinimas, todėl mažėja pagreitis. Po tam tikro laiko nusistovi pusiausvyra ir toliau dalelė juda pastoviu greičiu, kuris vadinamas nusodinimo greičiu w_n.

Nedideliu greičiu judanti dalelė (10.3 pav., *a*) sklandžiai perskiria terpę ir ši kitoje dalelės pusėje vėl sklandžiai susijungia. Toks dalelės judėjimas vadinamas laminariniu ($Re \leq 2$ arba $Ar < 36$).

Nusodinimo pasipriešinimo jėga laminariniam nusodinimo atveju yra proporcinga trinties jėgoms, atsirandančioms tarp skirtingu greičiu judančių terpės sluoksnių. Esant laminariniam nusodinimo režimui, dalelės nuo pat nusodinimo pradžios iki pabaigos sėda pastoviu greičiu w_n.

Pasipriešinimo dalelės judėjimui jėga *R* išreiškiama tokia lygtimi:

$$R = \zeta \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho_t \cdot w_n^2}{2}; \qquad (10.7)$$

čia *R* – pasipriešinimo jėga, N; ζ – terpės pasipriešinimo koeficientas, *d* – dalelės skersmuo, m; ρ_t – terpės tankis, kg/m^3; w_n – dalelės nusodinimo greitis, m/s.

Bandymais nustatyta, kad laminarinio nusodinimo atveju

$$\zeta = 24/Re. \qquad (10.8)$$

Didėjant dalelės nusodinimo greičiui, atsiranda sūkurių. Kai $500 > Re > 2$, prasideda vadinamasis pereinamasis dalelių judėjimas (pereinamasis nusodinimas), kuriam esant terpės pasipriešinimo koeficientas būna pastovus ir apskaičiuojamas pagal lygtį

$$\zeta = 18{,}5/Re^{0{,}6}. \qquad (10.9)$$

Dalelės judėjimo greičiui dar labiau padidėjus (10.3 pav., *b*), prasideda turbulentinis nusodinimo režimas ($Re > 500$), o terpės pasipriešinimo koeficientas yra pastovus – $\zeta = 0{,}44$.

Nusodinimo greitį visais atvejais nustatysime iš dalelę veikiančių jėgų (sunkio, Archimedo ir pasipriešinimo) pusiausvyros lygties:

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_d - \rho_t) = \zeta \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho_t \cdot w_n^2}{2}. \qquad (10.10)$$

Iš čia gauname:

$$w_n = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_d - \rho_t)}{3 \cdot \zeta \cdot \rho_t}}. \qquad (10.11)$$

Į (10.11) lygtį įrašę pasipriešinimo koeficiento vertę, esant laminariniam nusodinimui, $\zeta = 24/Re = (24 \cdot \mu)/(w_n \cdot d \cdot \rho_d)$, gauname:

$$w_n = d^2 \cdot (\rho_d - \rho_t) \cdot g/(18 \cdot \mu). \qquad (10.12)$$

Ši lygtis aprašo laminariškai judančių dalelių nusodinimo greitį ir vadinama *Stokso lygtimi*. Labai smulkių dalelių judėjimas priklauso nuo terpės molekulių šiluminio judėjimo. Jos, veikiamos sunkio jėgos, beveik nesėda. Todėl, kai $Re < 10^{-4}$, dalelių nusodinimo greičio pagal Stokso lygtį apskaičiuoti negalima.

Skaičiuojant dalelių nusodinimo greitį, nusodinimo režimas dažnai būna nežinomas. Tokiu atveju pagal Stokso lygtį apskaičiuojamas dalelių nusodinimo greitis w_n ir įrašomas į Reinoldso kriterijaus išraišką $Re = \frac{w_n \cdot d \cdot \rho_t}{\mu}$. Jeigu Re viršija nusodinimo proceso laminarinio režimo ribą, nusodinimo greitis nustatomas iš (10.11) lygties, imant kitą terpės pasipriešinimo koeficientą ζ, apskaičiuotą pagal (10.9) lygtį, arba laikant, kad $\zeta = 0{,}44$.

Nusodinimo greičiui apskaičiuoti gali būti taikomas ir patogesnis Liaščenkos metodas. Šiuo atveju iš (10.11) lygties apskaičiuojamas ζ:

$$\zeta = \frac{4 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_d - \rho_t)}{3 \cdot \rho_t \cdot w_n^2}. \qquad (10.13)$$

Abi (10.13) lygties puses padauginę iš $Re^2 = \frac{w_n^2 \cdot d^2 \cdot \rho_t^2}{\mu^2}$, gauname:

$$\zeta \cdot Re^2 = \frac{4 \cdot d^3 \cdot (\rho_d - \rho_t) \cdot \rho_t \cdot g}{3 \cdot \mu^2}. \qquad (10.14)$$

Dešinėje (10.14) lygties pusėje turime Archimedo kriterijaus išraišką. Taigi

$$\zeta \cdot Re^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar. \qquad (10.15)$$

Įrašius į (10.15) lygtį atitinkamo nusodinimo režimo pasipriešinimo koeficientą ζ, galima apskaičiuoti režimų ribas, išreikštas Ar kriterijumi. Šiuo atveju, nustatant nusodinimo režimą, nereikia žinoti nusodinimo greičio w_n.

Laminarinio režimo atveju $\zeta = 24/Re$. Tuomet

$$\frac{24}{Re} \cdot Re^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar. \qquad (10.16)$$

Iš čia $Re = \frac{Ar}{18}$. (10.17)

Į (10.17) lygtį įrašę kritinę $Re_{kr} = 2$ vertę, apskaičiuojame kritinę Ar kriterijaus vertę:

$$Ar_{kr} = 18 \cdot 2 = 36. \qquad (10.18)$$

Kai $Ar < 36$, nusodinimo režimas yra laminarinis. (10.17) lygtyje įrašę $Re = \frac{w_n \cdot d \cdot \rho_t}{\mu}$, gauname:

$$\frac{w_n \cdot d \cdot \rho_t}{\mu} = \frac{Ar}{18}. \qquad (10.19)$$

Iš čia $w_n = \frac{Ar \cdot \mu}{18 \cdot d \cdot \rho_t}$. (10.20)

Pagal (10.20) lygtį galima apskaičiuoti nusodinimo greitį, kai $Ar < 36$.

Analogiškai nustatome Ar kriterijaus ribas ir nusodinimo greičių lygtis, esant pereinamajam ir turbulentiniam režimams.

Pereinamasis nusodinimo režimas bus tada, kai

$$36 < Ar < 83000, \tag{10.21}$$

o nusodinimo greitis apskaičiuojamas taip:

$$w_n = 0{,}152 \cdot [\mu/(d \cdot \rho_t)] \cdot Ar^{0.715}. \tag{10.22}$$

Turbulentinis nusodinimo režimas esti tada, kai

$$Ar > 83000, \tag{10.23}$$

o nusodinimo greitis apskaičiuojamas pagal lygtį

$$w_n = 1{,}74 \cdot [\mu/(d \cdot \rho_t)] \cdot Ar^{0.5}. \tag{10.24}$$

Netaisyklingos formos dalelės sėda lėčiau negu rutulio formos dalelės. Todėl apskaičiuotą rutulio formos dalelės nusodinimo greitį reikia padauginti iš dalelės formos pataisos koeficiento φ (10.1 lent.):

$$w_{net.d} = \varphi \cdot w_n. \tag{10.25}$$

10.1 lentelė. Dalelės formos pataisos koeficientas φ

Dalelė	suapvalinta	kampuota	pailga	plokščia
φ	0,77	0,66	0,58	0,43

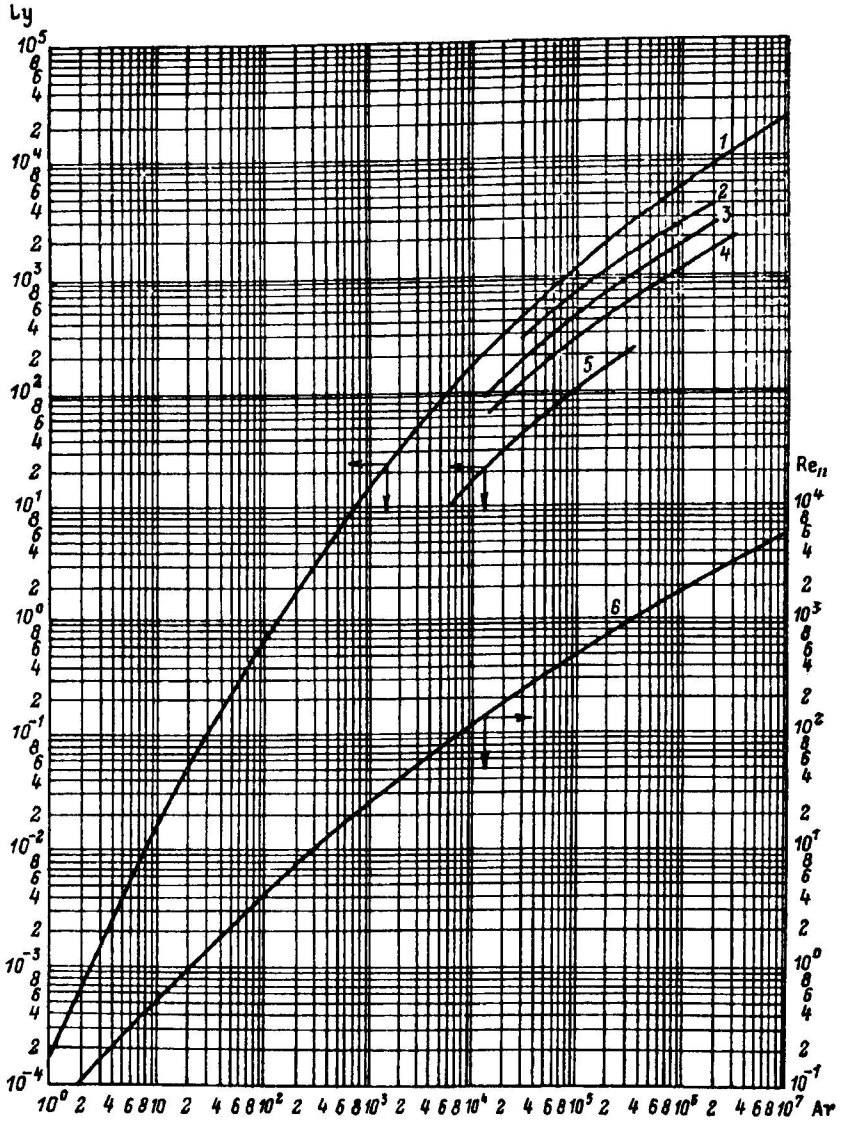
Technikoje nusodinimo greičiui apskaičiuoti patogu taikyti $Ly = f(Ar)$ grafiką (10.4 pav.). Čia Ly – Liaščenkos kriterijus:

$$Ly = Re^3/Ar = \left(w_n^3 \cdot \rho_t^2\right)/[\mu \cdot (\rho_d - \rho_t) \cdot g]. \tag{10.26}$$

Apskaičiavę Ar kriterijų, 10.4 pav. grafike parenkame Re arba Ly kriterijaus vertę. Įrašę Re vertę į (10.27) lygtį arba Ly vertę į (10.28) lygtį, apskaičiuojame dalelės nusodinimo greitį:

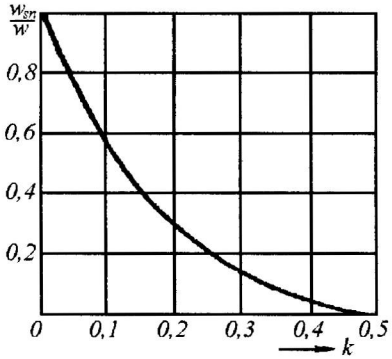
$$w_n = \frac{Re \cdot \mu}{d \cdot \rho_t}, \tag{10.27}$$

$$w_k = \sqrt[3]{\frac{Ly \cdot \mu \cdot (\rho_d - \rho_t) \cdot g}{\rho_t^2}}. \tag{10.28}$$



10.4 pav. *Ly* ir Re_n kriterijų priklausomybė nuo *Ar* kriterijaus, kai pavienės dalelės nusėda nejudamoje terpėje:
1 ir *6* – rutulio formos, *2* – suapvalintos, *3* – kampuotos, *4* – pailgos, *5* – plokščios dalelės

(10.27) ir (10.28) lygtys gautos pertvarkius *Re* ir *Ly* kriterijų išraiškas. Visas anksčiau užrašytas lygtis nusodinimo greičiui apskaičiuoti galima taikyti tik tuomet, kai nusėdančios dalelės neveikia viena kitos. Perskiriamos suspensijos dalelių nusėdimo greičiui w_{sn} didelę įtaką turi dalelių tūrinė koncentracija k (10.5 pav.).



10.5 pav. Dispersinės fazės tūrinės koncentracijos k įtaka faktinio ir teorinio nusodinimo greičių santykiui w_{sn}/w

Skaičiuojant apytiksliai, tariama, kad tikrasis nusodinimo greitis w_{sn} lygus pusei teorinio greičio:

$$w_{sn} \cong 0{,}5 \cdot w_n . \qquad (10.29)$$

Smulkiau kietų dalelių judėjimo skysčiuose (tiek lašeliniuose, tiek tampriuosiuose) dėsningumai buvo išnagrinėti šeštojoje dalyje. Joje pateiktos išvestos lygtys gali būti taikomos ir nedidelių skysčio lašelių nusodinimo dujose greičiui apskaičiuoti. Sėdant skysčio lašeliams skystyje, dėl skysčio cirkuliacijos lašelio viduje jo nusodinimo greitis būna 50 % didesnis už jam ekvivalentinių rutulinių kietųjų dalelių nusodinimo greitį. Ekvivalentinis rutulys – tai toks rutulys, kurio tūris lygus skysčio lašelio, dujų burbuliuko ar netaisyklingos kietos medžiagos dalelių tūriui.

Jei lašeliuose yra priemaišų arba paviršių aktyvinančių medžiagų, tada dujų arba garų cirkuliacijos tendencija sumažėja. Dalelių, kurių viduje nėra cirkuliacijos ir kurios vadinamos stangriomis, nusodinimo greitį reikia skaičiuoti pagal lygtis, išvestas kietoms dalelėms. Švarių skysčių dalelių nusodinimo greitis didėja lašelio ekvivalentiniam skersmeniui didėjant iki tam tikros d vertės, kuri vadinama kritine d_{kr}. Lašai, kurių $d > d_{kr}$, nusodinimo metu periodiškai keičia savo formą ir todėl vadinami osciliuojančiaisiais. Osciliuojantiesiems lašams didėjant, jų nusodinimo greitis po truputį mažėja.

Mažų lašelių laisvo nusodinimo greitį galima apskaičiuoti pagal Adamaro lygtį:

$$w_n = \frac{(\rho - \rho_t)\cdot g \cdot d^2 \cdot (\mu - \mu_t)}{6 \cdot \mu_t \cdot (2 \cdot \mu_t + 3 \cdot \mu)}; \qquad (10.30)$$

čia ρ ir ρ_t – skysčių dispersinės fazės ir terpės tankis, kg/m^3; μ ir μ_t – skysčių dispersinės fazės ir terpės klampa, Pa·s.

Adamaro lygtį galima naudoti, kai $Re_n < 1$ ($Re_n = (w_n \cdot d \cdot \rho_t)/\mu_t$).

Jeigu $\mu >> \mu_t$, vietoj (10.29) lygties galima imti (10.13) lygtį, skirtą kietų medžiagos dalelių laisvojo laminarinio nusodinimo greičiui apskaičiuoti.

Didelių lašų nusodinimo greičiai apskaičiuojami pagal empirines lygtis. Visos anksčiau pateiktos skaičiavimo lygtys ((10.31) ir 6 dalies lygtys) taikomos laisvajam nusodinimui, kada dispersinės fazės koncentracija labai maža ir jos dalelės judėdamos nesiliečia vienos su kitomis.

Pramonėje nusodinimu dažniausiai perskiriamos didelės koncentracijos suspensijos, kuriose dalelių nusodinimas yra suvaržytas, o jo greitis gali būti daug mažesnis už laisvojo nusodinimo greitį. Tokiomis sąlygomis dėl trinties tarp dalelių ir dėl jų tarpusavio susidūrimo pastebima skirtingo dydžio dalelių nusodinimo greičių vienodėjimo tendencija. Greičiams suvienodėjus, atsiranda kolektyvinis, arba solidarus (suvaržytas), dalelių nusėdimas, kurio greitis pagal aparato aukštį yra skirtingas: artėjant prie aparato dugno, nusėdimas lėtėja. Tai susiję su kylančių srautų atsiradimu terpėje – sėdančioms dispersinės fazės dalelėms išstumiant terpės daleles. Procesas pasunkėja, nes stambiosios dalelės aplenkia smulkiąsias. Suvaržytojo nusodinimo sąlygomis dispersinių dalelių koncentracija pagal nusodintuvo aukštį labai kinta: viršutinėje dalyje susidaro nuskaidrėjusio skysčio sluoksnis, žemiau jo – beveik laisvo nusodinimo zona, po juo – suvaržytojo nusodinimo zona, o apačioje, ant nusodintuvo dugno, – nuosėdų sluoksnis.

Suvaržytojo nusodinimo greitis w_{su} priklauso nuo laisvojo nusodinimo greičio ir suspensijos koncentracijos, kuri skaičiavimo lygtyse išreiškiama skysčio tūrio dalimis ε suspensijoje:

$$\varepsilon = V_{sk}/(V_{sk} + V_k); \qquad (10.31)$$

čia V_{sk} ir V_k – atitinkamai skysčio (terpės) ir dispersinės (kietosios) fazės tūris, m^3.

Suvaržytojo nusodinimo greičiui apskaičiuoti galima naudoti tokias lygtis:

kai $\varepsilon > 0{,}7$, $w_{su} = w_n \cdot \varepsilon^2 \cdot 10^{-1.82\cdot(1-\varepsilon)}$, (10.32)

kai $\varepsilon \le 0{,}7$, $w_{su} = w_n \cdot 0{,}123 \cdot \varepsilon^3/(1-\varepsilon)$. (10.32a)

Suvaržytojo nusodinimo greitį taip pat galima apskaičiuoti pagal tokią Reinoldso kriterijaus lygtį:

$$Re_{n,su} = Ar \cdot \varepsilon^{4,75} \Big/ \left(18 + 0{,}6 \cdot \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}} \right). \qquad (10.33)$$

Naudojant (10.32), (10.32a) ir (10.33) lygtis, galima apskaičiuoti vienodo dydžio rutulio formos dalelių suvaržytojo nusodinimo greitį. Kitos formos dalelių nusodinimo greitis apskaičiuojamas suvaržytojo rutulio formos dalelių nusodinimo greitį dauginant iš dalelės formos pataisos koeficiento φ ($\varphi < 1$), kurio vertė nustatoma bandymais. Skaičiuojant ne rutulio formos dalelių suvaržytojo nusodinimo greitį, jų skersmuo prilyginamas ekvivalentinio rutulio skersmeniui.

Suspensijos su skirtingo dydžio dalelėmis nusodinimo greičio negalima tiksliai apskaičiuoti; tokiais atvejais greitis nustatomas eksperimentiškai.

Skaičiavimo metodai, taikomi nusodinimo procesuose, gali būti taikomi ir hidraulinės klasifikacijos procesuose.

10.2.2. Nusodintuvai

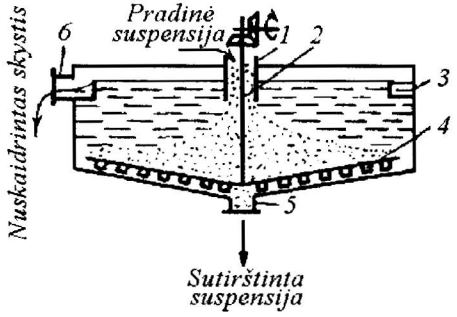
Nusodintuvai – tai aparatai, kuriuose suspensijos perskiriamos, nusodinant kietąsias daleles. Nusodintuvai, kuriuose koncentruojamos suspensijos, vadinami koncentratoriais, o kuriuose kietosios fazės suskirstomos į frakcijas pagal dalelių dydį, – klasifikatoriais. Nusodintuvai būna nuolatiniai, pusiau periodiniai ir periodiniai. Į nuolatinius nusodintuvus nenutrūkstamai tiekiama suspensija ir išleidžiamas nuskaidrėjęs skystis ir sutirštinta suspensija arba nuosėdos. Periodiniuose nusodintuvuose visi procesai vyksta periodiškai. Į pusiau periodinius nusodintuvus nepertraukiamai tiekiama suspensija ir išleidžiamas nuskaidrėjęs skystis, o po nusodinimo gauta koncentruota suspensija arba nuosėdos iškraunamos periodiškai.

Periodinius nusodintuvus dažniausiai sudaro baseinai be maišyklių. Toks nusodintuvas pripildomas suspensijos ir, praėjus suspensijai nusodinti reikalingai trukmei, pro antgalį su sklende, įrengtą virš nuosėdų sluoksnio, išleidžiamas nuskaidrėjęs skystis. Aparato dugne pasilikusios nuosėdos arba tiršta suspensija iškraunama per aparato viršų arba pro aparato apačioje esantį antgalį su sklende.

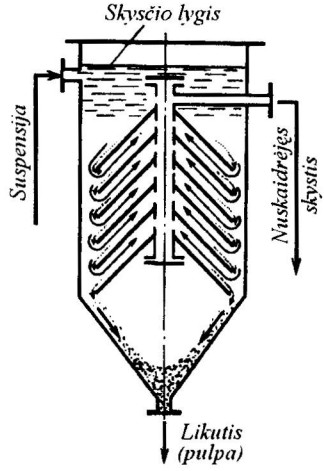
Iš nuolatinių nusodintuvų plačiai paplitę nusodintuvai su mechanine grėbline maišykle.

Nusodintuvai su mechanine grėbline maišykle. Pro centrinį atvamzdį *1* (10.6 pav.) suspensija ištisine srovele tiekiama į nusodintuvą. Per tą patį atvamzdį perkištas velenas *2* su maišymo mentėmis *4*. Elektros varikliui per reduktorių sukant veleną, mentės stumia nuosėdas dugnu jų pašalinimo angos *5* link ir priverčia vandenį kilti iš nuosėdų sluoksnio. Nuskaidrėjęs skystis

kyla į viršų, paskui liejasi per briauną į žiedinį lataką *3* ir juo nuteka į ištekėjimo atvamzdį *6*. Mentės sukamos lėtai (1,2...30 aps./h) ir nusodinimo proceso netrikdo. Tokiuose nusodintuvuose vykstantis procesas yra automatizuotas ir gaunamos homogeniškos nuosėdos. Šie nusodintuvai yra gana griozdiški (jų skersmuo nuo 1,8 m iki 30,0 m, atskirais atvejais iki 100 m). Daug kompaktiškesni yra daugiaaukščiai nusodintuvai, kuriuos sudaro 4...5 vienas virš kito sustatyti mažesnio skersmens nusodintuvai. Per šiuos nusodintuvus nuosekliai prateka perskiriamoji suspensija. Tačiau daugiaaukščių nusodintuvų konstrukcija yra sudėtingesnė.



10.6 pav. Nuolatinis suspensijų nusodintuvas su grėbline maišykle:
1 – centrinis atvamzdis, *2* – maišiklio velenas, *3* – žiedinis latakas, *4* – maišiklio mentės, *5* – nuosėdų pašalinimo anga, *6* – atvamzdis nuskaidrintam skysčiui ištekėti

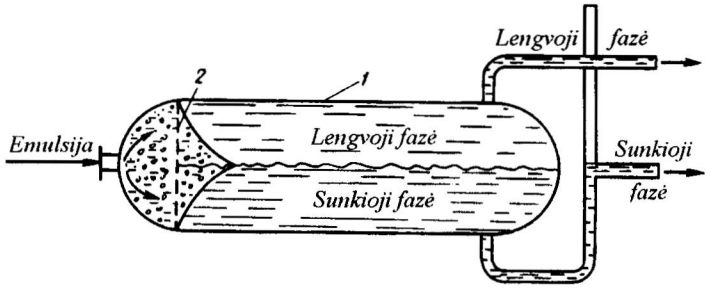


10.7 pav. Nuolatinis nusodintuvas su kūginėmis lentynomis

Didžiausias nusodintuvų trūkumas yra tai, kad iš jų pašalinamose nuosėdose būna daug skysčio (iki 60 %). Be to, jei nusodinimo greitis mažesnis kaip $0{,}9 \cdot 10^{-3}$ m/s, nusodintuvai yra neekonomiški.

Nesudėtingos konstrukcijos nuolatiniai nusodintuvai su kūginėmis didelio paviršiaus lentynomis. Į nusodintuvą (10.7 pav.) tiekiama suspensija pasiskirsto kanaluose tarp kūginių lentynų, ant kurių nusėda kietosios dalelės. Nuosėdos nušliaužia pasvirusiomis lentynomis link korpuso sienelių, o paskui nuslenka į aparato dugną ir iš čia pašalinamos. Nuskaidrėjęs skystis centriniu vamzdžiu kyla į viršų ir pro atvamzdį išteka iš aparato. Tokių nusodintuvų didelis nusodinimo paviršiaus, jie neturi judamų dalių, juos paprasta aptarnauti. Tačiau nuosėdos būna drėgnesnės nei nusodintuve su grėblinėmis maišyklėmis.

***Nuolatinį emulsijų nusodintuvą* (10.8 pav.)** sudaro cilindrinis rezervuaras *1*, kuriame prie emulsijos įleidimo antgalio yra akytoji pertvara *2*.

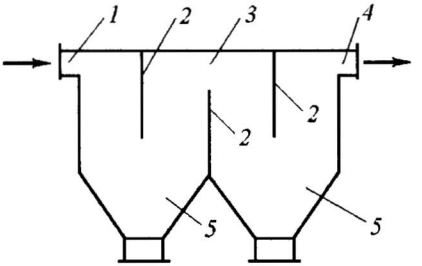


10.8 pav. Nuolatinis emulsijų nusodintuvas:
1– korpusas, *2* – akytoji pertvara

Emulsija, praėjusi pro pertvaros skylutes, laminariniu srautu teka išilgai rezervuaro keleto milimetrų per sekundę greičiu. Kai greitis mažas, ji sluoksniuojasi. Pro viršutinį atvamzdį išteka lengvoji, o pro apatinį – sunkioji emulsijos fazė. Fazių išleidimo atvamzdžių galų aukščiai priklauso nuo fazių tankių:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \qquad (10.34)$$

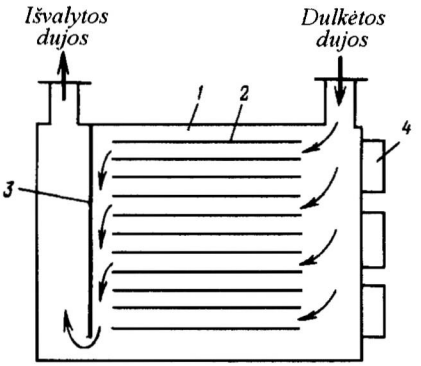
Dulkių perskyrimas sunkio jėga pramonėje taikomas retai. Nors dujinės nevienalytės sistemos dispersinės fazės ir terpės tankių skirtumas didelis, bet dėl susidarančių sūkurių dulkės, veikiamos sunkio jėgos, sėda lėtai. Šis būdas kartais taikomas pradiniam dujų valymui, t. y. stambiosioms dalelėms (> 100 μm) atskirti. Dulkių nusodintuvo arba kameros schema pavaizduota 10.9 ir 10.10 pav.



10.9 pav. Dulkių kamera:
1 – dulkių įleidimo atvamzdis, *2* – vertikaliosios atsimušimo pertvaros, *3* – nusodinimo kameros korpusas, *4* – išvalytų dujų išleidimo latakas, *5* –dulkių surinkimo bunkeriai

Dulkės pro įleidimo atvamzdį *1* tiekiamos į dulkių kamerą. Į vertikalias pertvaras *2* atsimušusios dulkių dalelės praranda kinetinę energiją, todėl krinta į surinkimo bunkerį *5*. Vertikalios pertvaros *2* taip pat prailgina dulkių buvimo dulkių kameroje trukmę. Ši kamera yra paprastos konstrukcijos, tačiau joje nusodinamos tik pačios stambiausios dalelės ir pasiekiamas nedidelis dujų išvalymo laipsnis.

Efektyviau dujas valo lentyninės dulkių kameros (10.10 pav.).



10.10 pav. Lentyninė dulkių perskyrimo kamera: *1* – korpusas, *2* – lentynos, *3* – atsimušimo pertvara, *4* – dulkių šalinimo latakai

Dulkės tiekiamos į dulkių kameros korpusą 1, kuriame įrengtos horizontalios lentynos 2. Atstumas tarp lentynų būna nuo 100 iki 300 mm. Dujoms tekant kanalais tarp lentynų, ant jų paviršiaus nusėda dulkės. Paskui dujų srautas, aptekėjęs vertikaliąją atsimušimo pertvarą 3, pasišalina iš dulkių kameros. Pertvarų 3 paskirtis – tolygiai paskirstyti dujų srautą tarp lentynų, be to, dujoms aptekant pertvarą, iš jų srauto, veikiant inercijos jėgai, nusėda dalis dul-

kių. Ant lentynų nusėdusios dulkės periodiškai šalinamos: nužeriamos stumtuvais (10.10 pav. jie nepavaizduoti) arba nuplaunamos vandeniu į latakus 4 ir pašalinamos iš kameros. Nors nusėdimo paviršius, esant dideliam lentynų skaičiui, gali būti gana didelis, dujų išvalymo laipsnis šiose kamerose neviršija 30...40 %, o 5 μm ir mažesnės dulkių dalelės visai neatskiriamos. Todėl dulkių nusodinimo kameros naudojamos pirminiam labai užterštų dujų valymui – kelių dešimtųjų mikrono dydžio dulkių dalelėms pašalinti.

Nusodintuvų skaičiavimas. Sutirštinimo aparatai skaičiuojami pagal smulkiausių suspensijos dalelių, kurias norima atskirti, nusodinimo greitį, o klasifikatoriai – pagal dalelių, kurias toje stadijoje reikia atskirti, nusodinimo greitį.

Tariama, kad srauto buvimo aparate trukmė τ yra lygi toliausiai nuo aparato dugno nutolusių dalelių nusodinimo trukmei τ_n. Kai $\tau > \tau_n$, tai dalis aparato bus nepanaudojama, o kai $\tau < \tau_n$, – priešingai, nusės ne visos dalelės.

Panagrinėsime stačiakampio gretasienio formos nusodintuvą. Trukmė τ gali būti apskaičiuota taip:

$$\tau = l/w; \qquad (10.34\ a)$$

čia l – aparato ilgis, m; w – srauto greitis, m/s.

Srauto greitis w apskaičiuojamas, naudojantis tūrio debito V_s lygtimi:

$$w = V_s/b \cdot h; \qquad (10.35)$$

čia V_s – nuskaidrėjusios terpės tūrio sekundinis debitas, m^3/s; b – nusodintuvo plotis, m; h – nuskaidrėjusios terpės sluoksnio storis, m.

$$\tau = l \cdot b \cdot h/V_s = F \cdot h/V_s; \qquad (10.36)$$

čia F – nusodinimo paviršius, m^2.

Nuo aparato dugno labiausiai nutolusių dalelių nusodinimo trukmei apskaičiuoti naudojama tokia lygtis:

$$\tau_n = h/w_{su}. \qquad (10.37)$$

Palyginę (10.36) ir (10.37) lygtis, gauname:

$$F \cdot h/V_s = h/w_{su}; \text{ iš čia } F = V_s/w_{su}. \qquad (10.38)$$

Tokia pat išraiška tinka ir cilindriniams nusodintuvams. Kartais lygtį trukmei τ nustatyti reikia integruoti. Integruojant reikia atsižvelgti į srauto skerspjūvio ploto kitimą, jam tekant nuo centro spindulio kryptimi.

(10.38) lygtis rodo, kad nusodintuvo našumas nepriklauso nuo jo aukščio. Todėl, projektuojant nusodintuvus, jų aukštį reikia imti kaip galima mažesnį, bet kad srautas tekėtų laminariniu režimu.

Atsižvelgiant į tai, kad $V_{val} = G_{val}/\rho$ (čia ρ – išvalytos terpės tankis, kg/m^3), ir naudojant (10.3) lygtį, (10.38) lygtis perrašoma taip:

$$F = G_m/(\rho \cdot w_{su}). \qquad (10.39)$$

Išvedant šią lygtį, neatsižvelgta į keletą aplinkybių, pabloginančių realiuose pramoniniuose aparatuose vykstantį nusodinimo procesą: galimą sūkurių susidarymą srauto įtekėjimo zonoje, užsistovėjimo zonų buvimą ir kt. Todėl inžineriniuose skaičiavimuose pagal (10.39) lygtį apskaičiuotą paviršių rekomenduojama padidinti nuo 30 iki 35 %.

10.2.3. Nusodinimas išcentrine jėga

Nusodinimas išcentrine jėga taikomas dulkėms, suspensijoms ir emulsijoms perskirti. Perskiriant išcentrine jėga, procesas suintensyvėja, nes jo varos jėga didesnė už perskyrimo nusodinant sunkio jėga varos jėgą.

Išcentrinių jėgų laukas nejudančiame aparate sukuriamas srautui suteikiant sukamąjį judėjimą arba srautą tiekiant į besisukantį aparatą, su kuriuo jis pradeda suktis. Pirmuoju atveju vadinamasis cikloninis procesas vykdomas aparatuose, vadinamuose ciklonais, antruoju atveju centrifuguojama nusodinamosiose centrifugose.

Nusodinimo išcentrine jėga efektyvumas nusakomas Frudo kriterijumi (*Fr*), kuris rodo išcentrinės jėgos $G_{iš}$ ir sunkio jėgos G_{sv} santykį:

$$Fr = \frac{G_{iš}}{G_{sv}} = \frac{\dfrac{m \cdot w_r^2}{r}}{m \cdot g} = \frac{w_r^2}{r \cdot g} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot r \cdot n)^2}{r \cdot g} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot n^2}{g}; \qquad (10.40)$$

čia m – dalelės masė, kg; w_r – apskritiminis greitis, m/s; r – aparato spindulys, m; n – sukimosi dažnis, s^{-1}.

Frudo kriterijus, aprašytas (10.40) lygtimi, dar vadinamas *perskyrimo faktoriumi* ir žymimas raide *f*. Šiuolaikinių aparatų perskyrimo faktorius *f* yra nuo 10^2 iki 10^6. Ciklonuose jis būna šimtų eilės, o centrifugose – apie 3000; taigi nusodinimo greitis ciklonuose ir centrifugose yra didesnis už nusodinimo greitį nusodintuvuose tiek kartų, koks yra perskyrimo faktorius. Todėl ciklonų ir centrifugų našumas didesnis negu nusodintuvų ir juose galima atskirti smulkias daleles: centrifugose iki 1 μm, o ciklonuose iki 10 μm.

Dalelių nusodinimo ciklonuose ir centrifugose greitį galima nustatyti taip, kaip aprašyta 6 dalyje, kai dalelės nusodinamos veikiant sunkio jėgai. Tačiau šiuo atveju reikia atsižvelgti ne tik į naują varos jėgos pobūdį, bet ir į tai, kad išcentrinė jėga didėja, dalelei tolstant nuo sukimosi centro. Sukantis nevienalytei skystai arba dujinei sistemai, terpėje pakibusios dalelės, išcentrinių jėgų veikiamos, juda nuo centro periferijos link. Šis dalelių judėjimo grei-

tis w_n vadinamas nusodinimo greičiu. Šiuo požiūriu dalelių nusodinimas išcentrine jėga yra toks pat kaip nusodinimas sunkio jėga. Šie metodai skiriasi daugiausia tuo, kad nusodinimo išcentrine jėga greitis yra kintamas dydis, nes jis didėja dalelei tolstant nuo sukimosi centro. Nusodinimo greitis nagrinėjamu atveju taip pat yra nepastovus ir didėja, didėjant dalelės sukimosi spinduliui. Tuo lengva įsitikinti, atsižvelgiant į tai, kad $w_r = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n$:

$$G_{iš} = m \cdot w_r^2 / r = m \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot n)^2 / r = m \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot r . \quad (10.41)$$

Nusodinimo greitį išreiškus lygtimi

$$w_n = dr/d\tau , \quad (10.42)$$

nusodinimo trukmė nustatoma integruojant:

$$\tau = \int_{R_1}^{R_2} (dr/w_n); \quad (10.43)$$

čia R_1 ir R_2 – minimalus ir maksimalus srauto sukimosi aparate spinduliai, m.

Į (10.43) lygtį įrašius nusodinimo greitį kaip funkciją, kurios išraiška priklauso nuo nusodinimo režimo, galima apskaičiuoti dalelės nusodinimo trukmę. Kai d skersmens rutulio formos dalelė nusodinama laminariniu režimu ($\zeta = 24/Re$),

$$w_n = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho_d - \rho_t) \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot r}{18 \cdot \mu \cdot g} . \quad (10.44)$$

(10.16) ir (10.18) nusodinimo greičio lygtis taip pat galima taikyti, esant pereinamajam arba turbulentiniam dalelių nusodinimo pobūdžiui.

Palyginus (10.44) ir (6.59) lygtis ir įvertinus (10.40) lygtį, matyti, kad laisvojo nusodinimo, veikiant išcentrinei jėgai, greitis yra f kartų didesnis už laisvojo nusodinimo greitį, veikiant sunkio jėgai. Įrašius (10.44) lygtį į (10.43) lygtį ir suintegravus, gaunama:

$$\tau = \frac{18 \cdot g \cdot \mu}{d^2 \cdot g \cdot (\rho_d - \rho_t) \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{4{,}5 \cdot \mu}{d^2 \cdot (\rho_d - \rho_t) \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot ln \frac{R_2}{R_1} . \quad (10.45)$$

Analogiškas lygtis dydžiams w_n ir τ apskaičiuoti galima išvesti esant pereinamajam ir turbulentiniam dalelių nusodinimo išcentrine jėga režimams.

Tačiau praktinių skaičiavimų, atliktų naudojant (10.44), (10.45) ir analogiškas lygtis, esant kitiems režimams, paklaidos būna gana didelės. Tai paaiškinama tuo, kad, nenutrūkstamai keičiantis nusodinimo greičiui, nenutrūkstamai keičiasi ir Re, o kartu atitinkamai gali keistis nusodinimo režimas ir $\zeta = f(Re)$.

Ciklonuose ir centrifugose susidaro sūkuriai, kurie iškreipia normalų dalelių nusodinimo procesą. Be to, jau nusėdusias daleles srautas gali įtraukti iš naujo. Centrifugose suspensijos sukimasis gali atsilikti nuo rotoriaus sukimosi, kas sumažina perskyrimo faktorių.

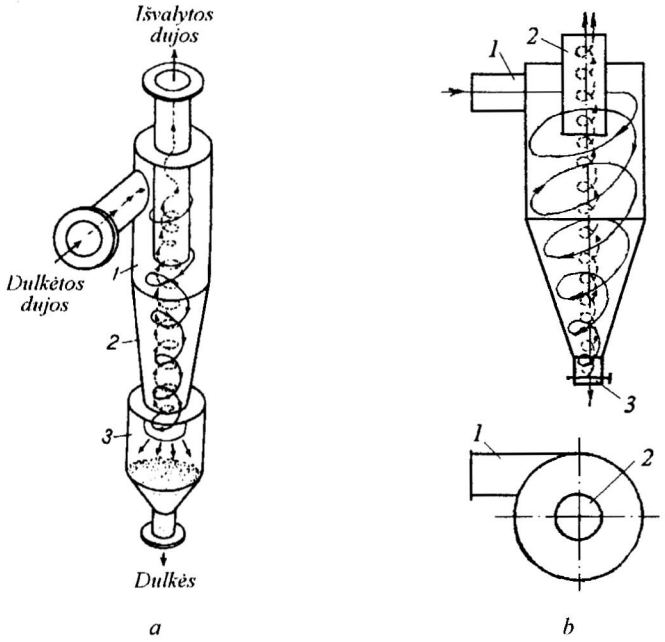
Skaičiavimai darosi sudėtingesni, kai polidispersinės suspensijos netaisyklingos formos dalelių nusodinimas yra suvaržytas.

Todėl inžineriniuose centrifugų ir ciklonų skaičiavimuose gana dažnai tenka remtis eksperimentų duomenimis.

10.2.4. Ciklonai ir nusodinamosios centrifugos

Ciklonai. Cikloninis procesas savo pavadinimą gavo nuo ciklonų – dulkių perskyrimo aparatų. Tokiu pat principu veikiantys aparatai – hidrociklonai taip pat naudojami suspensijoms perskirti ir skysčio lašeliams atskirti nuo dujų.

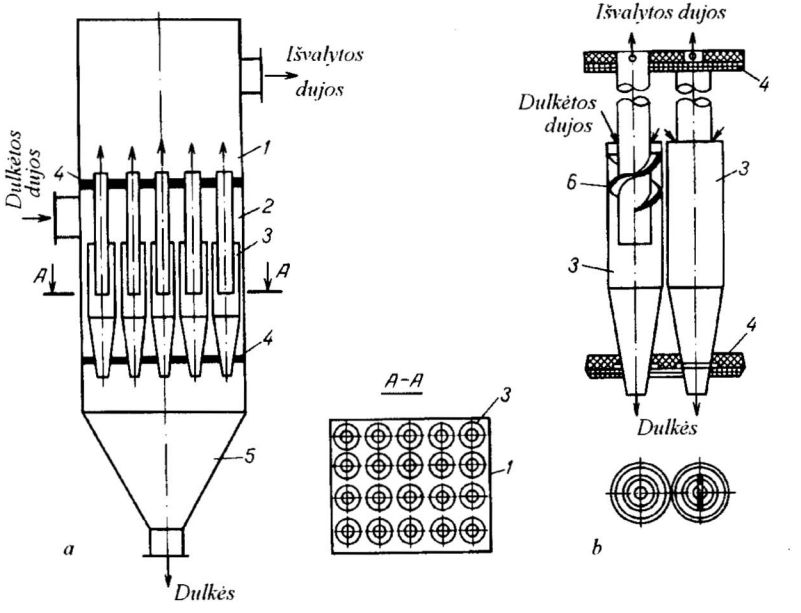
Ciklono aksonometrinė schema pavaizduota 10.11 pav., *a*, o pjūviai – 10.11 pav., *b*.



10.11 pav. Ciklonas:
a – aksonometrinė schema: *1* – cilindrinis korpusas, 2 – kūginis dugnas, *3* – iškrovimo bunkeris; *b* – pjūviai: *1* – dujų ir dulkių tiekimo atvamzdis, *2* – išvalytų dujų išleidimo atvamzdis, *3* – dulkių išbyrėjimo anga

Cikloną sudaro cilindrinis korpusas *1* su kūginiu dugnu *2*. Dulkėtos dujos į korpusą tiekiamos tangentine (liestinės) kryptimi pro atvamzdį 20...30 m/s greičiu. Dėl tangentinio tiekimo srautas ima suktis apie išvalytų dujų išleidimo vamzdį, įtaisytą ciklono ašyje. Dulkių dalelės iščentrinės jėgos bloškiamos prie korpuso sienelės. Aparate susidaro du spiralės formos srautai: išorinis dulkėtų dujų, kuris juda žemyn išilgai ciklono sienelių, ir vidinis išvalytų dujų, kuris, judėdamas į viršų, išsidėsto arti ciklono centro ir iš jo pasišalina. Dulkės koncentruojasi arti sienelių ir jomis patenka į iškrovimo bunkerį *3*.

Dulkių išvalymo ciklonuose laipsnis yra tuo didesnis, kuo didesnis perskyrimo faktorius *f*. Iš (10.40) lygties matyti, kad *f* galima padidinti mažinant srauto sukimosi spindulį (ciklono skersmenį) arba didinant jo greitį. Tačiau tai padidina aparatų hidraulinį pasipriešinimą ir srauto turbulentiškumą, kuris blogina nusodinimo procesą ir leidžia susimaišyti išvalytoms ir dulkėtoms dujoms. Sumažėjus ciklono spinduliui, kartu sumažėja ir jo našumas. Todėl, kai reikia išvalyti didelius dulkėtų dujų kiekius, vietoj vieno didelio skersmens ciklono naudojami keli mažesnio skersmens ciklonai, sumontuoti viename korpuse. Tokie aparatai vadinami ciklonų baterija (multiciklonu).



10.12 pav. Multiciklono (*a*) ir jo elementų (*b*) schemos: *1* – korpusas, *2* – dujų paskirstymo kamera, *3* – ciklono elementai, *4* – rėtinės plokštės, *5* – dulkių surinkimo bunkeris, *6* – spirale išdėstytos mentelės

Multiciklono ir jo elementų schemos pavaizduotos 10.12 pav. Bendro ciklono korpuso *1* rėtinėse plokštėse *4* hermetiškai įtvirtinti ciklono elementai *3*. Dulkėtos dujos pro įleidimo atvamzdį tiekiamos į dujų paskirstymo kamerą *2*, o iš jos – į ciklono elementų žiedinę erdvę tarp elemento *3* korpuso ir išvalytų dujų išleidimo atvamzdžio. Šioje erdvėje įrengtos spirale išdėstytos mentelės *6*, suteikiančios dujų srautui sukamąjį judėjimą. Dulkės, spaudžiamos prie elemento sienelių, juda žemyn spirale ir iškrinta į visiems elementams bendrą bunkerį *5*. Išvalytos dujos vamzdžiais išteka į bendrą kamerą ir pašalinamos iš aparato pro viršutinį atvamzdį.

Ciklono skersmuo dažniausiai būna nuo 40 iki 1000 mm, ciklonų baterijos elemento – nuo 40 iki 250 mm.

Pramonėje naudojami įvairių konstrukcijų ciklonai. Plačiai paplitę ciklonai, kurių skiriamoji ypatybė yra pasviręs stačiakampio skerspjūvio atvamzdis, pro kurį į cikloną tiekiamos dulkėtos dujos. Dėl tokios ciklono konstrukcijos dulkės, jau įtekėdamos į jį, ima suktis spirale ir dėl to sumažėja aparato hidraulinis pasipriešinimas.

Suspensijoms perskirti naudojamų hidrociklonų ir multihidrociklonų konstrukcija panaši į ciklonų ir multiciklonų konstrukciją.

Kai kurių pramoninių ciklonų pagrindiniai parametrai pateikiami 10.2 lentelėje.

10.2 lentelė. Pramoninių ciklonų pagrindiniai parametrai

Ciklono parametrai*	Vertė
Išvalytų dujų išleidimo atvamzdžio skersmuo, m	0,6
Šio vamzdžio aukštis, m	1,56...2,11
Tiekimo antgalio (stačiakampio skerspjūvio) plotis, m	0,26
Tiekimo antgalio aukštis, m	0,48...1,11
Cilindrinės korpuso dalies aukštis, m	1,56...2,11
Kūginės korpuso dalies aukštis, m	1,75...2,0
Bendras ciklono aukštis, m	4,26...4,56
Pasipriešinimo koeficientas	60...250

*Visi linijiniai matmenys duoti ciklono skersmens dalimis.

Dulkių išvalymo iš dujų laipsnis:

- 30...85 %, kai dalelių skersmuo $d = 5$ μm;
- 70...95 %, kai $d = 10$ μm;
- 95...99 %, kai $d = 20$ μm.

Dujų išvalymo ciklonų baterijoje laipsnis mažiau priklauso nuo dalelių dydžio ir atitinkamai (pagal anksčiau nurodytus dalelių skersmenis 5, 10 ir

20 μm) būna 65...85, 85...90 ir 90...95 %. Kuo didesnis aparato hidraulinis pasipriešinimas, tuo didesnis dujų išvalymo laipsnis.

Cikloninio proceso aparatų konstrukcija paprasta, jie neturi judamųjų dalių, juose galima apdoroti chemiškai agresyvias dujas. Ciklonuose pasiekiamas didesnis išvalymo laipsnis negu gravitaciniuose aparatuose. Jie yra kompaktiškesni už nusodintuvus. Valomų dujų temperatūra gali būti iki 500 °C.

Šių aparatų trūkumai – palyginti didelis hidraulinis pasipriešinimas (ciklonų būna 400...700 Pa), nedidelė sugaunamų mažesnių kaip 10 μm dalelių dalis, mechaninis korpuso išsidėvėjimas, jautrumas apkrovimo pagal dujas arba skystį kitimui. Todėl ciklonų tipo aparatai nelabai tinka atskirti nuo dujų abrazyvioms ir mažesnėms kaip 10 μm dalelėms. Be to, turi būti ribojama kietųjų dalelių koncentracija į aparatus tiekiamose dujose.

Ciklonų skaičiavimas. Ciklonų, kaip ir kitų cheminės technologijos aparatų, skaičiavimai gali būti projektiniai ir patikrinamieji. Projektiniai skaičiavimai atliekami tada, kai reikia pagal turimą dulkėto oro debitą, dulkių kilmę, jų koncentraciją ore ir dalelių dydį suprojektuoti ir pagaminti procesui atlikti reikalingą cikloną. Patikrinamųjų skaičiavimų metu pagal technologinio proceso sąlygas ir turint pagamintą pramoninį cikloną, nustatomos jo optimalios darbo sąlygos (pvz., optimalus dujų srauto greitis). Skaičiavimų pradžioje pasirenkamas ciklonų tipas arba jis jau būna žinomas.

Ciklonų skaičiavimai pagal teorinius dėsningumus yra gana sudėtingi, todėl praktikoje dažniausiai skaičiuojama pagal supaprastintą metodiką.

Hidrauliniai nuostoliai ciklone apskaičiuojami pagal tokią lygtį:

$$\Delta p = \zeta \cdot w_c^2 \cdot \rho / 2 ; \qquad (10.46)$$

čia w_c – sąlyginis srauto greitis ciklone, m/s (optimalios w_c vertės 3...3,6 m/s); ρ – srauto tankis, kg/m^3; ζ – ciklono pasipriešinimo koeficientas.

Iš (10.46) lygties išreiškus santykį $\Delta p/\rho$, gaunama:

$$\Delta p/\rho = \zeta \cdot w_c^2 / 2 . \qquad (10.47)$$

Bandymais nustatyta, kad kiekvieno tipo ciklonų $\Delta p/\rho$ turi optimalią vertę (pvz., anksčiau nurodytų ciklonų $\Delta p/\rho = 500...750$ m^2/s^2). Turint skaičiuojamo tipo ciklonui optimalią šio santykio vertę ir žinant hidraulinio pasipriešinimo koeficiento ζ vertę, pagal (10.47) lygtį apskaičiuojamas w_c. Toliau skaičiuojamas ciklono skersmuo D_c:

$$D_c = \sqrt{4 \cdot V_s / (\pi \cdot w_c)} . \qquad (10.48)$$

Žinant ciklono skersmenį, iš žinynų parenkamas artimiausias reikiamo tipo pramoninis ciklonas. Pagal ciklono pase nurodytus matmenų santykius

apskaičiuojami kiti linijiniai ciklono matmenys. Po to naudojant literatūroje pateiktas nomogramas, sudarytas remiantis eksperimentiniais tyrimais ir nusakančias išvalymo laipsnio sąryšį su dulkių frakcine sudėtimi, tankiu, dujų dulkėtumu prieš išvalymą ir daugeliu kitų veiksnių, nustatomas dujų išvalymo laipsnis. Jeigu nustatytas išvalymo laipsnis bus nepakankamas, pasirinkus naują didesnę $\Delta p/\rho$ vertę, padidinamas w_c ir sumažinamas ciklono skersmuo. Parenkamas kito tipo ciklonas, kurio hidraulinio pasipriešinimo koeficientas didesnis, t. y. efektyvesnis ciklonas, arba siūloma naudoti keletą lygiagrečiai veikiančių mažesnio skersmens ciklonų. Pastaruoju atveju w_c lieka nepasikeitęs ir šitaip padidinamas ciklono efektyvumas nepadidinant jame hidraulinių nuostolių. Ciklonų tipas ir jų skaičius gali būti patikslintas atlikus proceso techninius ekonominius skaičiavimus.

Suspensijoms sutirštinti, taip pat kietosioms dalelėmis klasifikuoti, pagal jų dydį, naudojami hidrauliniai ciklonai. Jų veikimo principas toks pat kaip ir ciklonų.

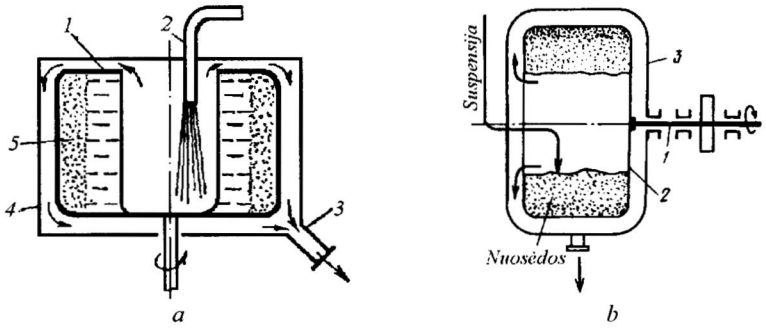
Centrifugos. Centrifugos klasifikuojamos: 1) pagal darbo principą: a – nusodinamosios, b – filtruojamosios; 2) pagal darbo organizavimą: a – periodinės; b – nuolatinės; 3) pagal išcentrinio lauko intensyvumą, kuris apibūdinamas perskyrimo faktoriumi f (normaliosios centrifugos, kai $f < 3500$, ir ultracentrifugos, kai $f > 3500$), 4) pagal nuosėdų iškrovimo būdą: iškraunamos rankomis, peiliu, gravitaciniu, pulsaciniu, inerciniu bei hidrauliniu būdu; 5) pagal konstrukciją: horizontaliosios ir vertikaliosios. Vertikaliosios būna kabančiosios, kurioms judesys suteikiamas iš viršaus, ir stovinčiosios, kurioms judesys suteikiamas iš apačios; 6) pagal judesio suteikimo būdą: a – kai centrifugos velenas tiesiogiai sujungtas su elektros varikliu, b – kai elektros variklis prijungtas per diržinę pavarą, c – kai elektros variklis prijungtas per sraigtinę pavarą.

Toliau šiame skyriuje nagrinėsime tik nusodinamąsias centrifugas.

Periodinė nusodinamoji centrifuga su vertikaliu būgnu (10.13 pav., *a*).

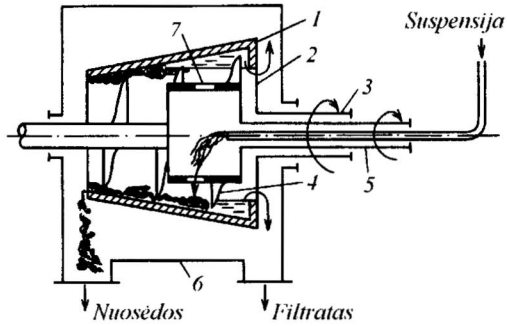
Pradėjus suktis būgnui *1*, į jo vidų vamzdžiu *2* tiekiama suspensija. Iš pradžių skysčio laisvasis paviršius yra paraboloido formos, paskui, padidėjus sukimosi greičiui iki darbinio, skysčio laisvasis paviršius tampas beveik lygiagretus su būgno sienele. Kietosios dalelės, veikiamos išcentrinių jėgų, sėda ant būgno sienelės, o nuskaidrintas skystis kyla į viršų, liejasi per būgno kraštą į nejudamą gaubtą *4* ir iš jo išteka pro atvamzdį *3*. Nuosėdos iškraunamos rankomis.

Panašiai veikia ir nusodinamoji centrifuga su horizontaliu būgnu (10.13 pav., *b*), kurioje būgnas ir velenas išdėstyti horizontaliai.



10.13 pav. Periodinė nusodinamoji centrifuga:
a – su vertikaliu būgnu: *1* – būgnas, *2* – suspensijos tiekimo vamzdis, *3* – nuskaidrinto skysčio išleidimo atvamzdis, *4* – apsauginis gaubtas, *5* – nuosėdos; *b* – su horizontaliu būgnu: *1* – besisukantis velenas, *2* – būgnas, *3* – apsauga

Nuolatinę nusodinamąją sraigtinę centrifugą (10.14 pav.) sudaro du būgnai: kūginis, pritvirtintas prie tuščiavidurio veleno *3*, ir cilindrinis, pritvirtintas prie tuščiavidurio veleno *5*. Velenai sukami skirtingais greičiais ta pačia kryptimi. Greičių skirtumas ne didesnis kaip 6 %. Suspensija vamzdžiu patenka į cilindrinį būgną, jame tolygiai pasiskirsto ir pro angą *7* išteka į kūginį būgną *1*. Ant jo vidinio paviršiaus susidariusios nuosėdos mentėmis *4* išstumiamos į korpusą *6* ir pro specialų antgalį pašalina. Filtratas pro angas *2* išteka į centrifugos korpusą ir pro specialias angas pašalinamas.

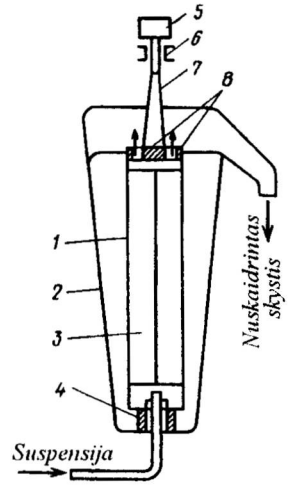


10.14 pav. Nuolatinė nusodinamoji centrifuga: *1* – kūginis būgnas, *2* – filtrato pašalinimo angos, *3* – tuščiaviduris kūginio būgno velenas, *4* – nuosėdų nužėrimo mentės, *5* – tuščiaviduris cilindrinio būgno velenas, *6* – centrifugos korpusas, *7* – cilindrinio būgno anga

Nuolatinėmis nusodinamosiomis centrifugomis galima apdoroti suspensiją su didele dispersinių dalelių koncentracija. Didžiausiu jų trūkumu laikytina

tai, kad nuosėdose būna daug skysčio, o nuskaidrėjusiame filtrate – daug kietosios fazės. Be to, tokios centrifugos sunaudoja daug energijos.

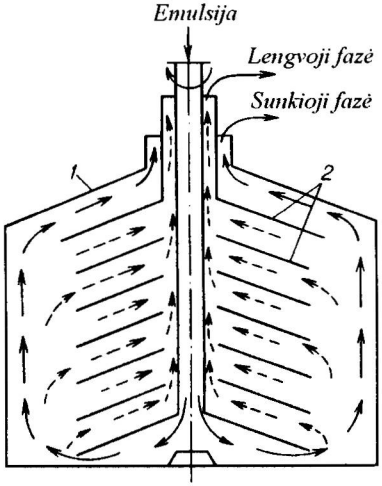
Vamzdinė ultracentrifuga. Vamzdinė periodinė skysčio nuskaidrinimo ultracentrifuga pavaizduota 10.15 paveiksle. Korpuse *2* dideliu greičiu (iki 750 s^{-1}) sukamas būgninis rotorius *1*, kurį sudaro vientisas vamzdis be angų. Vamzdžio viduje yra radialinės mentės *3*, kurios būgnui sukantis trukdo skysčiui nusėsti ant jo vidinio paviršiaus. Būgnas standžiai sujungtas su kūginiu velenu *7*, įtvirtintu ant atramos *6*. Velenas sukamas skriemuliu *5*. Apatinėje centrifugos dalyje įtaisytas atraminis guolis *4*, kurio vidinis žiedas pritvirtintas prie suspensijos tiekimo į būgno vidų vamzdžio. Kietos suspensijos dalelės, veikiamos išcentrinės jėgos, sėda ant būgno sienelių, o nuskaidrėjęs skystis išteka pro išleidimo angas *8* ir specialius vamzdžius. Būgne susikaupusios nuosėdos periodiškai, sustabdžius centrifugą, pašalinamos rankomis. Kadangi tokių centrifugų būgno tūris mažas, tai jos naudojamos perskirti suspensijoms, turinčioms ne daugiau kaip 1 % kietosios fazės. Tokių centrifugų perskyrimo faktorius būna iki 15000.



10.15 pav. Vamzdinė periodinė skysčio nuskaidrinimo ultracentrifuga:
1 – vamzdinis būgninis rotorius, *2* – korpusas, *3* – radialinės mentės, *4* – guolis, *5* – diržinės pavaros skriemulys, *6* – atrama, *7* – velenas, *8* – nuskaidrinto skysčio išleidimo anga

Šio tipo centrifugos tinka ir emulsijoms perskirti, tačiau jų konstrukcija sudėtingesnė. Jų viršutinėje būgno dalyje turi būti įrengtas specialus įtaisas, kuris pro atskiras angas praleidžia skirtingų tankių skysčius.

Emulsijas nusodinančios centrifugos dažnai vadinamos separatoriais. Plačiai paplitę būgniniai lėkštiniai separatoriai (10.16 pav.).



10.16 pav. Būgninio lėkštinio separatoriaus schema:
1 – būgnas, *2* – lėkštės

Emulsija centriniu vamzdžiu patenka į apatinę besisukančio būgno – rotoriaus dalį. Būgne yra keletas kūginių pertvarų – lėkščių *2*, kurios mišinį padalija į kelis sluoksnius ir sumažina nusėdančių dalelių nueitą kelią. Didesnio tankio skystis išcentrinės jėgos bloškiamas į būgno periferinę dalį, todėl mažesnio tankio skystis pasislenka būgno centro link. Skysčių judėjimo keliai pavaizduoti rodyklėmis. Perskirti skysčiai nesusiliečia, todėl negali iš naujo susimaišyti.

Nagrinėtojo separatoriaus lėkštės skylėtos. Suspensijoms perskirti gali būti naudojami ir separatoriai su angų neturinčiomis lėkštėmis. Tokiuose separatoriuose iš suspensijų atskirta kieta dispersinė fazė nusėda ant vidinės korpuso sienelės. Nuskaidrėjęs skystis juda būgno centro link, kyla į viršų ir išteka. Ant būgno sienelių susidariusios nuosėdos pašalinamos rankomis.

Jau yra sukurti nuolatiniai separatoriai, iš kurių nuosėdos iškraunamos automatizuotai.

Būgniniams lėkštiniams separatoriams būdingas didelis našumas ir gera perskyrimo kokybė, tačiau jų konstrukcija gana sudėtinga. Perskyrimo faktorių ($f > 3000$) galima padidinti, didinant separatoriaus sukimosi dažnį arba mažinant sukimosi spindulį. Tokiais separatoriais jau galima perskirti smulkių dispersinių dalelių suspensijas ir emulsijas.

Nuolatinių nusodinamųjų centrifugų skaičiavimas. Centrifugas galima skaičiuoti kaip nusodintuvus, kuriuose dalelės nusodinamos f kartų didesniu greičiu negu gravitaciniu būdu (veikiant tik sunkio jėgai).

Darant šią prielaidą, (10.39) lygtis centrifugoms skaičiuoti gali būti užrašyta taip:

$$F = \frac{G_m \cdot (x_n - x_m)}{\rho_m \cdot w_{svr} \cdot f \cdot \zeta \cdot (x_n - x_{iš})}; \qquad (10.49)$$

čia F – nusodinimo paviršius, m^2; G_m – perskiriamos suspensijos kiekis, arba centrifugos našumas, kg/s; x_m, x_n, $x_{iš}$ – kietosios fazės koncentracija atitinkamai suspensijoje, nuosėdose ir filtrate; ρ_m – perskiriamos suspensijos tankis, kg/m^3; w_{svr} – suvaržytojo gravitacinio nusodinimo greitis, m/s; ζ – perskyrimo efektyvumo koeficientas.

Jeigu neatsižvelgsime į nuosėdų sluoksnio storį, tai centrifugų su cilindriniu būgnu

$$F = \pi \cdot D_{vid} \cdot l, \qquad (10.50)$$

$$f = 2 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot D_{vid} / g; \qquad (10.51)$$

čia D_{vid} – vidutinis filtrato srauto skersmuo būgne, m; $D_{vid} = 0{,}5 \cdot (D_v + D_0)$; D_v – suspensijos sluoksnio vidinis skersmuo būgne, m; D_0 – centrifugos būgno vidinis skersmuo, m; l – būgno aukštis, m; f – perskyrimo faktorius

(10.49) lygties koeficientas ζ vadinamas perskyrimo efektyvumo koeficientu. Juo įvertinamas perskyrimo efektyvumo sumažėjimas dėl skysčio slydimo būgno sienele, sūkurinių srautų susidarymo, maišančio sraigto poveikio ir kitų veiksnių. Koeficientas ζ apskaičiuojamas pagal empirines formules. Nuolatinėms centrifugoms jo vidutinė vertė $\zeta = 0{,}2...0{,}25$.

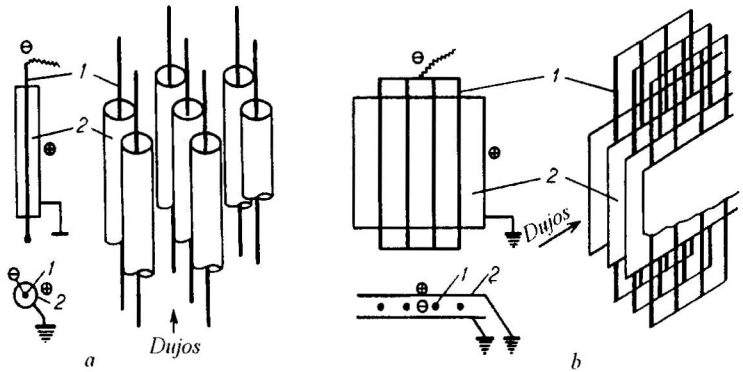
Į (10.49) lygtį įrašius (10.50) ir (10.51) lygtis ir atlikus pertvarkymus (iškėlus G_m į kairiąją pusę), gaunama lygtis, pagal kurią apskaičiuojamas centrifugos našumas:

$$G_m = 2 \cdot \pi^3 \cdot D_{vid}^2 \cdot \ell \cdot \rho_{iš} \cdot w_{svr} \cdot n^2 \cdot \zeta / [g \cdot (x_n - x_m)/(x_n - x_{iš})]. \qquad (10.52)$$

Atskirais atvejais centrifugos našumas išreiškiamas ne perskiriamos suspensijos, o susidariusių nuosėdų kiekiu G_n. Centrifugos didžiausias našumas pagal kietosios fazės kiekį nurodomas jos techninėje charakteristikoje (pase). Darbo metu pasiekiamas centrifugos našumas pagal kietąją fazę sudaro 50...80 % teorinio našumo. Jeigu apskaičiuotas našumas pagal nuosėdas G_n yra didesnis už darbinį našumą pagal kietąją fazę, būtina atitinkamai sumažinti tiekiamos suspensijos kiekį G_m.

10.2.5. Nusodinimas elektriniame lauke

Nusodinimu elektros lauke galima efektyviai išvalyti labai smulkias dispersines kietosios ir skystosios fazių daleles iš nevienalyčių dujinių sistemų. Aparatai, kuriuose vyksta šis procesas, vadinami elektriniais filtrais. Perskyrimas elektros lauke pagrįstas tuo, kad leidžiant aerozolį (dujas, turinčias garų) per nuolatinės srovės aukštosios įtampos (30...100 kV) elektrinį lauką, atsiradusį tarp dviejų skirtingais krūviais įkrautų elektrodų, vyksta dalinė dujų molekulių jonizacija. Drėgnose dujose iš jose esančių molekulių lengviausiai jonizuojasi vandens molekulės. Jeigu dujos, turinčios laisvų krūvių (elektronų, jonų), atsiranda tarp dviejų elektrodų, sudarančių nuolatinį elektrinį lauką, tai tie laisvi krūviai pradeda judėti pagal lauko jėgos linijas. Judėjimo greitis ir kinetinė energija nusakoma elektrinio lauko įtampa. Potencialų skirtumui padidėjus iki keleto dešimčių kilovoltų, jonų ir elektronų kinetinė energija tampa pakankama, kad jie susidurtų su neutraliomis dujų molekulėmis ir jas suskaidytų į jonus ir laisvuosius elektronus. Naujai susidarę krūviai judėdami taip pat jonizuoja dujas. Jonų susidarymas vyksta laviniškai, o dujos visiškai jonizuojasi. Tokia jonizacija vadinama smūgine. Šiuo atveju atsiranda sąlygos elektros išlydžiui įvykti. Toliau didinant elektrinio lauko įtampą susidaro sąlygos įvykti elektriniam pramušimui ir elektrodų trumpajam sujungimui.



10.17 pav. Elektrodų forma:
a – vamzdiniai, *b* – plokštieji; *1* – vainikiniai elektrodai, *2* – nusodinantieji elektrodai

Norint to išvengti, sudaromas nevienalytis elektrinis laukas: vienas elektrodas daromas iš vielos, o kitas – iš jį apgaubiančio vamzdžio arba greta išdėstytų plokščių (10.17 pav.). Didžiausias lauko stiprumas šiuo atveju būna prie vielos, o artėjant prie vamzdžio arba plokštės po truputį mažėja ir tampa nebepakankamas elektriniam pramušimui įvykti. Kai laukas yra pakankamai stiprus, kad vyktų visiška dujų jonizacija, tarp elektrodų susidaro vainikinis

išlydis ir apie vielos elektrodą atsiranda šviečiantis vainikas. Todėl šis elektrodas vadinamas vainikiniu (jonizuojančiuoju) elektrodu. Priešingo krūvio (vamzdžio arba plokštelės) elektrodas vadinamas nusodinančiuoju. Jonizuojantieji elektrodai jungiami prie elektros šaltinio neigiamojo poliaus, o nusodinantieji – prie teigiamojo. Dėl tokios elektrodų konstrukcijos galima naudoti didesnes įtampas ir nesusidaro elektros išlydis.

Jonizuojančiojo elektrodo srityje susidarę teigiamieji jonai juda link vainikinio elektrodo ir ant jo neutralizuojasi. Neigiamieji jonai ir laisvieji elektronai juda link nusodinančiojo elektrodo. Savo kelyje sutikę dulkių daleles arba skysčio lašelius, esančius dujose, suteikia jiems neigiamą krūvį ir priverčia judėti link nusodinančiojo elektrodo. Todėl dispersinės dalelės nusėda ant nusodinančiojo elektrodo. Tam tikra labai maža dispersinių dalelių dalis vainiko (jo skerspjūvis gerokai mažesnis už erdvės tarp elektrodų skerspjūvį) srityje susiduria su teigiamąjį krūvį turinčiomis dalelėmis, nusėda ant jonizuojančiojo elektrodo.

10.17 pav. pavaizduoti anodai – vamzdžiai arba plokštės *2* – vadinami nusodinančiaisiais elektrodais, o katodai – įtemptos vielos *1* – jonizuojančiaisiais elektrodais. Teigiamasis polius įžeminamas. Dėl nevienodo elektrodų paviršiaus tarp jų atsiranda nevienalytis elektrinis laukas.

Prie neigiamojo elektrodo susidaro jonizuotų dujų sluoksnis. Iš jo neigiamieji dujų jonai, judėdami teigiamojo elektrodo link, susiduria su dujų srauto nešamomis dispersinės fazės dalelėmis ir jas neigiamai įelektrina. Tokios dalelės, veikiamos elektrinio lauko, pakeičia savo judėjimo kryptį – pradeda judėti teigiamojo elektrodo link. Dalelės jam atiduoda savo elektros krūvį ir, tapusios neutralios, krinta žemyn. Kartais dulkių dalelės prilimpa prie teigiamojo elektrodo. Norint jas pašalinti, reikia tuos elektrodus specialiu mechanizmu periodiškai krestelėti.

Dujų išvalymo elektriniuose filtruose laipsnis daug priklauso nuo dulkių elektrinio laidumo ir jų adhezinės gebos (gebėjimo prikibti prie medžiagos paviršiaus). Jeigu dalelės laidžios elektrai, bet jų adhezijos jėgos mažos, dalelė, pasiekusi nusodinantįjį elektrodą, atiduoda jam savo krūvį, įgauna jo krūvį ir grįžta į dujų srautą, todėl gali būti srauto išnešta iš elektrinio filtro. Dėl to sumažėja dujų išvalymo laipsnis. Jeigu dulkės blogai praleidžia elektros srovę, o adhezijos jėgos pakankamai stiprios, tai ant nusodinančiojo elektrodo susidaro tankus neigiamai įkrautų dalelių sluoksnis, veikiantis pagrindiniam elektriniam laukui priešinga kryptimi. Kai šis sluoksnis labai storas, įtampa jo porose gali viršyti kritinę vertę ir prie nusodinančiojo elektrodo gali prasidėti dujų jonizacija – „atvirkštinis vainikas“. Šis reiškinys taip pat mažina valymo efektyvumą. Jį galima pašalinti, laiku nuvalant nuo nusodinančiojo elektrodo dulkes.

Valant dujas, turinčias didelę kietųjų dalelių koncentraciją, srovės jėga tarp elektrodų gali sumažėti iki nulio – „vainikas išnyksta“, nes srovė tokio-

mis sąlygomis yra pernešama tik įkrautų dulkių dalelių, kurių judrumas, palyginti su jonų judrumu, yra mažas. Norint išvengti šio reiškinio, reikia sumažinti dujų tiekimo greitį, kartu sumažinant elektrinių filtrų apkrovimą, arba dujas prieš elektrinius filtrus valyti kitais įrenginiais (pvz., dulkių kameroje).

Normaliai dirbančių elektrinių filtrų dujų valymo efektyvumas priklauso nuo tokių veiksnių: dujų savybių (cheminės sudėties, temperatūros, drėgnio), kietosios fazės savybių (cheminės sudėties, elektrinių savybių, dispersiškumo), dulkių koncentracijos, dujų greičio, elektrinių filtrų parametrų ir kt.

Teoriškai visų šių parametrų įvertinti negalima, todėl dujų valymo efektyvumas dažniausiai nustatomas eksperimentiškai. Dalelių nusodinimo greitis gali būti nustatomas žinant, kad dalelę nešanti jėga lygi terpės pasipriešinimo jėgai. Elektros laukas dalelę veikia jėga

$$P = n \cdot e_0 \cdot E_x; \qquad (10.53)$$

čia n – dalelės gautų krūvių skaičius; e_0 – elementaraus krūvio dydis; E_x – lauko stiprumas.

Terpės pasipriešinimo rutulio formos dalelei jėga išreiškiama (10.7) lygtimi:

$$R = \zeta \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \rho \cdot w_n^2}{4 \cdot 2}.$$

Vykstant laminariniam nusodinimui, būdingam elektriniams filtrams, $\zeta = 24/Re$.

Įrašę ζ ir Re išraiškas, gauname:

$$R = \frac{24 \cdot \mu}{w_n \cdot d \cdot \rho} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot w_n^2}{2} = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d \cdot w_0. \qquad (10.54)$$

Palyginę (10.53) ir (10.54) lygtis, gauname:

$$n \cdot e_0 \cdot E_x = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d \cdot w_n .$$

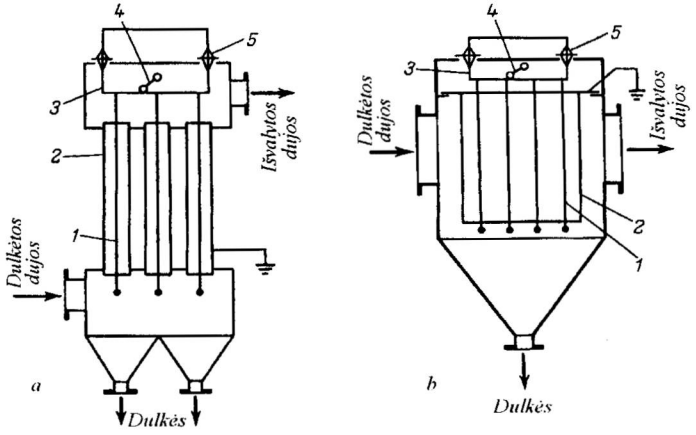
Iš čia

$$w_n = n \cdot e_0 \cdot E_x / (3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d). \qquad (10.55)$$

Pagal (10.55) lygtį galima apskaičiuoti rutulio formos dalelių laisvojo nusodinimo žinomo krūvio elektriniame lauke greitį. Praktiškai skaičiavimai pagal šią lygtį yra gana sunkūs, kadangi dalelės krūvis priklauso nuo daugelio veiksnių (dalelės dydžio, jos medžiagos dielektrinės skverbties, lauko stiprumo ir t. t.) ir negali būti nustatytas pakankamai tiksliai. Be to, kaip buvo sakyta anksčiau, lauko stiprumas kinta nuo didžiausios vertės prie jonizuojančiojo elektrodo iki mažiausios – prie nusodinančiojo elektrodo.

10.2.6. Elektriniai filtrai

Pagal elektrodų formą elektriniai filtrai skirstomi į vamzdinius ir plokštinius, o pagal iš dujų pašalinamas dispersines daleles – į sausuosius ir šlapiuosius. Sausuosiuose filtruose dujos valomos esant temperatūrai, aukštesnei už dujų rasos taško temperatūrą, ir juose sugaudomos sausos dulkės. Šlapiuosiuose elektriniuose filtruose sugaudomos drėgnos dulkių dalelės ir nusodinami dujose pakibę skysčio lašeliai.



10.18 pav. Vamzdiniai (*a*) ir plokštiniai (*b*) elektriniai filtrai:
1 – vainikiniai elektrodai, *2* – nusodinantieji elektrodai, *3* – rėmas,
4 – elektrodų supurtymo mechanizmas, 5 – izoliatoriai

Vamzdinis elektrinis filtras (10.18 pav., *a*). Jo nusodinantieji elektrodai *2* yra 0,15...0,30 m skersmens ir 3...4 m ilgio vamzdžiai, kurių centre įrengti vainikiniai jonizuojantieji elektrodai *1*, pagaminti iš 1,5...2 mm skersmens vielos. Elektrodai pakabinti ant rėmo *3*, remiančiosi į izoliatorius *5*. Dulkėtos dujos tiekiamos pro aparato apatinės dalies šone esantį atvamzdį ir toliau teka vamzdžiais *2*. Kietos dalelės nusėda ant vamzdžių vidinio paviršiaus, o išvalytas oras išteka pro aparto viršutinės dalies atvamzdį. Sausuosiuose elektriniuose filtruose kietosios dalelės pašalinamos periodiškai specialiu mechanizmu *4* supurtant elektrodus. Šlapiuosiuose filtruose elektrodų paviršius periodiškai arba nenutrūkstamai nuplaunamas vandeniu.

Analogiškai įrengti ir dirba plokštiniai elektriniai filtrai (10.18 pav., *b*). Nuo vamzdinių elektrinių filtrų jie skiriasi daugiausiai tuo, kad jų nusodinantieji elektrodai yra ant rėmų ištemptos stačiakampės plokštės arba tinklai.

Plokštiniai elektriniai filtrai kompaktiškesni už vamzdinius, iš jų lengviau pašalinamos dulkės. Savo ruožtu vamzdiniais elektrodais galima sudaryti

stipresnius elektrinius laukus ir todėl elektriniai filtrai su vamzdiniais elektrodais yra našesni ir geriau atskiria sunkiai sugaudomas kietas ir skystas daleles.

Atstumas tarp plokštinių elektrinių filtrų elektrodų dažniausiai būna 0,1...0,2 m. Dujos elektriniuose filtruose dažniausiai būna 3...3,5 s. Kai nusodinamos chemiškai agresyvios dalelės ir naudojami švininiai elektrodai, dujos filtruose išbūna ilgiau – iki 6 s. Dujų srauto greitis aparate 0,5...1 m/s. Valomos dujos gali būti iki 500 °C temperatūros.

Nors elektriniuose filtruose naudojama aukštosios įtampos (40...75 kV) pastovioji srovė, elektros sąnaudos 1000 m^3 dujų išvalyti nedidelės – 0,2...0,3 kWh. Hidrauliniai nuostoliai elektriniuose filtruose mažesni negu daugelyje kitų dujų valymo aparatų ir sudaro 150...200 Pa. Dujų išvalymo laipsnis yra vienas didžiausių ir siekia 95...99 %.

Elektriniai filtrai palyginti brangūs, jų eksploatacija sudėtinga, jie netinka mažos elektros varžos dalelėms išvalyti iš dujų.

Elektrinių filtrų skaičiavimas. Elektriniai filtrai skaičiuojami, panaudojant leistino valomų dujų srauto greičio elektriniame lauke praktinius duomenis. Žinodami šį greitį ir valomų dujų kiekį, pagal debito lygtį apskaičiuojame darbinį (aktyvųjį) elektrinių filtrų skerspjūvio plotą.

Pagal reikalingą aktyvaus skerspjūvio plotą ir pasirinkto elektrinio filtro skerspjūvio plotą nustatomas reikalingas elektrinis filtrų skaičius. Jeigu galima tiksliai nustatyti dalelių nusodinimo elektriniuose filtruose greitį, dujų išvalymo laipsnį (%) galima apskaičiuoti pagal lygtį

$$\eta = \left(1 - e^{-w_n \cdot f}\right) \cdot 100; \qquad (10.56)$$

čia w_n – dalelės nusodinimo greitis, m/s; f – nusodinančiųjų elektrodų ploto, m^2, ir valomų dujų debito, m^3/s, santykis.

10.3. Filtravimas

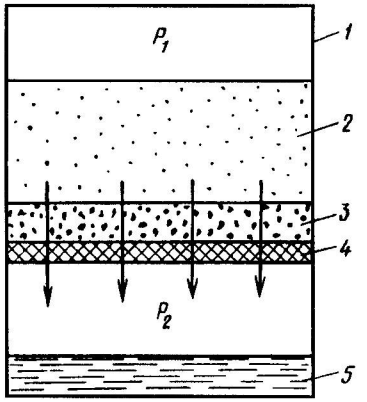
Filtravimas yra suspensijų, dulkių bei dūmų leidimas per akytąją pertvarą norint iš skysčio ar dujų atskirti kietąsias daleles. Pertvarų sulaikytos kietosios dalelės vadinamos nuosėdomis, o per pertvarą perėjusi medžiaga – filtratu.

Principinė filtravimo proceso schema pavaizduota 10.19 pav. Filtrą sudaro indas, kurio korpusą *1* filtracinė pertvara *4* dalija į dvi dalis.

Suspensija 2 tiekiama į viršutinę indo dalį virš filtracinės pertvaros. Abipus filtracinės pertvaros sudaromas slėgių skirtumas $\Delta p = p_1 - p_2$, dėl kurio skystis teka pro filtracinės pertvaros poras ir sudaro filtratą *5*. Kietas daleles sulaiko filtracinė pertvara, ant kurios susidaro nuosėdos *3*.

Filtravimo proceso varos jėga yra slėgių skirtumas (Δp) abipus filtracinės pertvaros. Šis slėgių skirtumas atsiranda dėl filtruojamo skysčio hidrostatinio slėgio virš pertvaros, taip pat siurbliais bei kompresoriais sudaromo viršslėgio

virš pertvaros arba vakuuminiais siurbliais po pertvara sudaromo išretinimo. Slėgio skirtumas gali susidaryti veikiant išcentrinėms jėgoms. Aparatai, kuriuose slėgių skirtumas sudaromas išcentrine jėga, vadinami filtruojamosiomis centrifugomis. Visi kiti filtravimo aparatai vadinami filtrais.



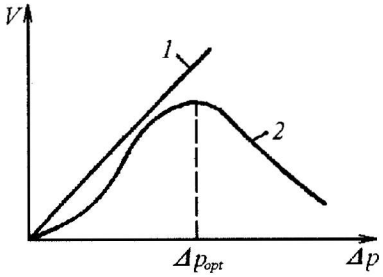
10.19 pav. Suspensijos filtravimo schema:
1 – korpusas, *2* – suspensija, *3* – nuosėdos, *4* – filtracinė pertvara, *5* – filtratas

Akytosios filtracinės pertvaros parenkamos atsižvelgiant į filtruojamų medžiagų cheminę sudėtį, temperatūrą, klampą, kietųjų dalelių dydį, pertvaros mechaninį atsparumą, jos kainą ir perskyrimo aparato konstrukciją. Tai gali būti: 1) grūdinės medžiagos (smėlis, žvyras, anglys, koksas, diatomitas); 2) pluoštinės medžiagos (stiklo vata, asbestas, organinis ir sintetinis pluoštas); 3) audiniai (vilnoniai, medvilniniai, sintetiniai – organiniai ir neorganiniai); 4) kietosios akytosios medžiagos (porolitas, diatomitas, porcelianas, metaliniai tinkleliai, akytosios metalinės plokštės).

Filtracinės pertvaros ir filtruojant susidarančios nuosėdos skirstomos į *spūdžiąsias* ir *nespūdžiąsias*.

Spūdžiosiomis vadinamos tokios medžiagos, kurių poringumas mažėja didėjant slėgių skirtumui. Mažėjant poringumui, didėja nuosėdų hidraulinis pasipriešinimas filtratui. Nespūdžiosiomis vadinamos medžiagos, kurių poringumas, didėjant slėgių skirtumui, nekinta.

Filtruojant pro nespūdžiąsias nuosėdas (10.20 pav., linija *1*), filtrų našumas tiesiai proporcingas slėgių skirtumui, o filtruojant pro spūdžiąsias nuosėdas (10.20 pav., kreivė *2*), našumas didėja tik iki tam tikros vertės, todėl filtruoti patartina esant optimaliam slėgių skirtumui ($\Delta p \leq 10^5$ Pa).



10.20 pav. Priešingose pertvarų pusėse susidariusio slėgių skirtumo įtaka filtrų našumui, kai susidaro: *1* – nespūdžiosios nuosėdos, *2* – spūdžiosios nuosėdos

Filtravimo procese nusėdusios kietosios dalelės apsunkina procesą ir turi įtakos jo dėsningumams. Dalelių nusėdimo įtaka filtravimui priklauso nuo sunkio jėgos ir filtrato tekėjimo krypčių. Jeigu suspensija yra ant filtracinės pertvaros (kietųjų dalelių sėdimo ir filtrato judėjimo kryptys sutampa), kietųjų dalelių nusėdimas paspartina nuosėdų sluoksnio susidarymą. Jeigu suspensija yra po filtracine pertvara (kietosios dalelės sėda filtrato judėjimui priešinga kryptimi), toks nusodinimas trukdo ant filtracinės pertvaros susidaryti nuosėdų sluoksniui. Tuo atveju tolydinumui užtikrinti suspensiją reikia maišyti.

Atsižvelgiant į susidarančių nuosėdų pobūdį, filtravimas skirstomas į keturias rūšis: 1) filtravimas, kurio metu ant filtracinės pertvaros susidaro storas nuosėdų sluoksnis; 2) filtravimas, kurio metu smulkios nuosėdos užkemša filtracinės pertvaros poras; 3) filtravimas pridėjus pagalbinių medžiagų; 4) suspensijų tirštinimas prieš filtravimą. Pramonėje dažniausiai filtruojama pirmuoju būdu.

Storas nuosėdų sluoksnis susidaro filtruojant suspensijas, kuriose kietosios fazės tūris didesnis kaip 1 % ir yra dalelių, stambesnių už filtracinių pertvarų poras. Tuomet filtravimo pradžioje susidaręs pradinis nuosėdų sluoksnis neleidžia labai smulkioms kietosioms dalelėms patekti į pertvarų poras ir jas užkimšti. Susidaręs gana storas nuosėdų sluoksnis pašalinamas, o filtracinė pertvara išplaunama ir vėl naudojama filtruoti.

Filtruojant suspensijas, kurių kietosios fazės tūris mažesnis kaip 0,1 % ir visos dalelės mažesnės už filtracinės pertvaros poras, susidaro palankios sąlygos dalelėms patekti į pertvaros poras. Pramonėje taip filtruojama retai, nes, nespėjus susidaryti nuosėdų sluoksniui, užsikemša filtracinė pertvara. Kad neužsikimštų filtracinė pertvara ir geriau filtruotųsi mažų koncentracijų suspensijos, į jas pridedama 0,1...2 % pagalbinių medžiagų (diatomito, asbestinio pluošto, aktyviųjų anglių ir kt.). Kartais filtracinės pertvaros paviršius padengiamas pagalbinių medžiagų sluoksniu ir tik tuomet filtruojama smulkiųjų dalelių suspensija.

Nuolatiniais filtrais galima filtruoti suspensijas, kurių kietųjų dalelių tūrinė koncentracija ne mažesnė kaip 10 %. Mažesnių koncentracijų suspensijas reikia tirštinti (atskirti dalį skysčio): leisti nusėsti dalelėms (dėl sunkio jėgos) arba suspensijas praleisti pro specialius periodinius filtrus. Sutirštintos suspensijos greičiau filtruojamos, kompaktiškesnė aparatūra, švaresnis filtratas.

Filtravimo proceso intensyvumą nusako filtravimo greitis w, m/s, t. y. filtrato kiekis, perėjęs per filtravimo paviršių per laiko vienetą:

$$w = \frac{dV}{S \cdot d\tau}; \qquad (10.57)$$

čia w – filtravimo greitis, m/s; V – filtrato tūris, m^3; S – filtracinės pertvaros paviršiaus plotas, m^2; τ – filtravimo trukmė, s.

Filtravimo greitis priklauso nuo slėgių skirtumo priešingose pertvaros pusėse, kietųjų dalelių ir filtracinės pertvaros fizikinių savybių ir skysčio klampos.

Pagal tai, kaip keičiasi filtravimo greičio ir slėgių skirtumas priešingose pertvaros pusėse, skiriami tokie filtravimo atvejai: 1) pastovus slėgių skirtumas ir mažėjantis filtravimo greitis; 2) pastovus filtravimo greitis ir didėjantis slėgių skirtumas; 3) kintant slėgių skirtumui, kinta ir filtravimo greitis.

Pastovus slėgių skirtumas ir dėl susidarančio nuosėdų sluoksnio mažėjantis filtravimo greitis gaunami, kai virš filtracinės pertvaros palaikomas pastovus suspensijos sluoksnis (suspensijos hidrostatinis slėgis taip pat pastovus) arba pastovus slėgių skirtumas palaikomas kompresoriais ir vakuuminiais siurbliais.

Pastovus filtravimo greitis, didėjant nuosėdų sluoksnio storiui, gaunamas didinant slėgių skirtumą abipus filtracinės pertvaros. Tai pasiekiama, kai suspensijos į filtrus tiekiamos siurbliais (dažniausiai membraniniais), kurių našumas, didėjant sudaromam slėgiui, išlieka pastovus.

Tiekiant suspensiją iščentriniais siurbliais ir esant nedideliam pertvaros pasipriešinimui, slėgių skirtumas būna mažas. Todėl, didėjant nuosėdų sluoksniui, didėja filtro hidraulinis pasipriešinimas ir turi būti didinamas siurblio sudaromas slėgis. Ir šiuo atveju filtravimo greitis mažėja, bet ne taip greitai kaip tada, kai palaikomas pastovus slėgių skirtumas.

Paprastai filtravimo procesas nepasibaigia suspensiją perskyrus į nuosėdas ir filtratą. Prieš pašalinant nuo filtracinės pertvaros, nuosėdos praplaunamos kitu skysčiu, kad būtų pašalinti filtrato likučiai, ir prapučiamos šaltomis arba pašildytomis dujomis – kad sumažėtų jų drėgnumas.

Filtro našumas ir filtrato grynumas priklauso nuo filtracinės pertvaros. Tinkamai parinkta pertvara turi sulaikyti kietąsias daleles ir užtikrinti gaunamo filtrato švarumą bei mažiausią hidraulinį pasipriešinimą. Be to, nuo pertvaros turi lengvai atsiskirti nuosėdos, ji turi būti pakankamai mechaniškai

stipri. Tai, kad pradiniu filtravimo periodu kietosios dalelės pereina per filtracinę pertvarą, nereiškia, jog ji netinkamai parinkta. Geriausiai nuosėdas pertvara sulaiko tada, kai susidarius nuosėdų sluoksniui sumažėja jos porų skersmuo. Todėl šalinant nuosėdas plonas jų sluoksnis paliekamas.

Filtravimo proceso skaičiavimas. Filtravimas yra sudėtingas procesas ir jį galima skaičiuoti tik neatsižvelgiant į kai kurių sunkiai matematiškai aprašomų veiksnių įtaką procesui. Eksperimentais nustatyta, kad filtruojamasis skystis per nuosėdas ir pertvaros poras teka laminariniu režimu, nes filtracinėje pertvaroje ir nuosėdų sluoksnyje poros mažos ir skystosios fazės judėjimo greitis taip pat nedidelis. Taigi filtravimo greitis tiesiai proporcingas slėgių skirtumui Δp ir atvirkščiai proporcingas skysčio klampai μ, nuosėdų sluoksnio R_n bei filtracinės pertvaros R_p pasipriešinimų sumai:

$$w = \Delta p / \left[\mu \cdot \left(R_n + R_p\right)\right]. \qquad (10.58)$$

Palyginus (10.57) ir (10.58) lygtis, gaunama pagrindinė filtravimo diferencialinė lygtis:

$$dV/\left(S \cdot d\tau\right) = \Delta p / \left[\mu \cdot \left(R_n + R_p\right)\right]. \qquad (10.59)$$

Skysčio tekėjimo greitis kapiliaruose taip pat gali būti apskaičiuojamas pagal Hageno ir Puazeilio lygtį:

$$w = \frac{\Delta p \cdot d^2}{32 \cdot \mu \cdot l}; \qquad (10.60)$$

čia w – skysčio tekėjimo greitis, m/s; Δp – slėgių skirtumas kapiliaro galuose, Pa; d – kapiliaro skersmuo, m; μ – skysčio dinaminė klampa, Pa·s; l – kapiliaro ilgis, m.

Pritaikę Hageno ir Puazeilio lygtį filtravimui, iš (10.57) ir (10.60) lygčių gauname:

$$\frac{dV}{S \cdot d\tau} = \frac{\Delta p \cdot d^2}{32 \cdot \mu \cdot l}. \qquad (10.61)$$

Kadangi hidrodinaminių procesų greitis tiesiai proporcingas slėgių skirtumui ir atvirkščiai proporcingas hidrauliniam pasipriešinimui, tai $\frac{32 \cdot \mu \cdot l}{d^2} = R$ yra hidraulinis pasipriešinimas ir (10.61) lygtį galima užrašyti taip:

$$\frac{dV}{S \cdot d\tau} = \frac{\Delta p}{R}. \qquad (10.62)$$

Hidraulinis pasipriešinimas yra nuosėdų ir pertvaros hidraulinių pasipriešinimų suma:

$$R = R_n + R_p \,. \tag{10.63}$$

Įrašę R vertę į (10.59) lygtį, gauname:

$$\frac{dV}{S \cdot d\tau} = \frac{\Delta p}{R_n + R_p} \,. \tag{10.64}$$

(10.59) ir (10.64) lygtims pertvarkyti į integruoti patogią formą būtina R_n ir R_p išreikšti filtrato kiekio funkcija. Filtravimo metu dėl kietųjų dalelių prasiskverbimo į pertvaros poras gali padidėti R_p. Tačiau šis padidėjimas yra nedidelis, todėl praktiniams tikslams galima imti R_p = *const*. Didėjant nuosėdų sluoksnio storiui, jų hidraulinis pasipriešinimas R_n didėja nuo nulio filtravimo pradžioje iki didžiausios vertės jo pabaigoje. Neatsižvelgiant į gravitacinio nusodinimo įtaką nuosėdų susidarymui, galima teigti, kad nuosėdų tūris V_n tiesiai proporcingas filtrato tūriui V:

$$V_n = x_0 \cdot V \,; \tag{10.65}$$

čia x_0 – proporcingumo koeficientas, priklausantis nuo kietosios fazės koncentracijos ir nuosėdų struktūros (nustatomas eksperimentiškai išmatavus nuosėdų tūrį, susidariusį pratekėjus 1 m^3 filtrato).

Nuosėdų tūris išreiškiamas sandauga $S \cdot h_n$ (h_n – nuosėdų sluoksnio storis; S – nuosėdomis padengto filtravimo paviršiaus plotas). Tada

$$h_n \cdot S = x_0 \cdot V \,. \tag{10.66}$$

Iš čia

$$h_n = x_0 \cdot V / S \,. \tag{10.67}$$

Nuosėdų sluoksnio pasipriešinimas užrašomas ir taip:

$$R_n = r_0 \cdot h_n \,; \tag{10.68}$$

čia r_0 – nuosėdų sluoksnio savitasis tūrinis pasipriešinimas, m^{-2}, t. y. 1 m sluoksnio storio nuosėdų pasipriešinimas skystosios fazės srautui.

Į (10.68) lygtį įrašius (10.67) lygties išraišką, gaunamas ryšys tarp nuosėdų pasipriešinimo ir filtrato tūrio:

$$R_n = r_0 \cdot x_0 \cdot V / S \,. \tag{10.69}$$

Iš (10.59) ir (10.69) lygčių gaunama priklausomybė

$$\frac{dV}{S \cdot d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu \cdot \left((r_0 \cdot x_0 \cdot V/S) + R_p \right)} \qquad (10.70)$$

Ši lygtis ir yra pagrindinė filtravimo lygtis. Ją išsprendus, gaunamos filtravimo lygtys įvairiems daliniams atvejams.

Toliau nagrinėsime tik filtravimą, esant pastoviam slėgių skirtumui, bei nuosėdų praplovimą kaip filtravimą, taip pat esant pastoviam slėgių skirtumui ir filtravimo greičiui.

Filtravimo lygtis, esant pastoviam slėgių skirtumui.

(10.70) lygtį galima užrašyti ir taip:

$$\mu \cdot \left(r_0 \cdot x_0 \cdot V/S + R_p \right) \cdot dV = \Delta p \cdot S \cdot d\tau \, .$$

Pertvarkę šią lygtį ir kairiąją pusę suintegravę nuo *0* iki *V*, o dešiniąją – nuo *0* iki τ, gausime:

$$\frac{\mu \cdot r_0 \cdot x_0}{S} \cdot \int_0^V V \cdot dV + \mu \cdot R_p \cdot \int_0^V dV = \Delta p \cdot S \cdot \int_0^\tau d\tau \, ,$$

$$\left(\mu \cdot r_0 \cdot x_0 / S \right) \cdot \left(V^2/2 \right) + \mu \cdot R_p \cdot V = \Delta p \cdot S \cdot \tau \, .$$

Pastarąją lygtį padaliję iš reiškinio $\mu \cdot r_0 \cdot x_0/(2 \cdot S)$, gausime:

$$V^2 + 2 \cdot R_p \cdot S \cdot V/(r_0 \cdot x_0) = 2 \cdot \Delta p \cdot S^2 \cdot \tau/(\mu \cdot r_0 \cdot x_0) . \qquad (10.71)$$

Ši lygtis vadinama filtravimo, esant pastoviam slėgių skirtumui, lygtimi.

Realiuose procesuose filtracinės pertvaros pasipriešinimas, palyginti su nuosėdų sluoksnio pasipriešinimu, yra mažas ir jo galima nepaisyti. Tada (10.71) lygtis užrašoma taip:

$$V^2 = 2 \cdot \Delta p \cdot S^2 \cdot \tau/(\mu \cdot r_0 \cdot x_0) . \qquad (10.72)$$

(10.71) ir (10.72) lygtys taikomos, kai filtravimo metu susidaro ne tik nespūdžiosios, bet ir spūdžiosios nuosėdos. Kai $\Delta p = const$, r_0 ir x_0 vertės filtravimo procese taip pat lieka pastovios.

Filtravimo, esant pastoviam slėgių skirtumui ir filtravimo greičiui, lygtis.

Esant pastoviam filtravimo greičiui, santykį $dV/d\tau$ galima pakeisti santykiu V/τ. Kai nagrinėjamas procesas atliekamas tik esant pastoviam nuosėdų sluoksnio storiui, reiškinys $x_0 \cdot V/S$ pakeičiamas nuosėdų sluoksnio storiu h_n. Tada (10.71) lygtis užrašoma taip:

$$V/(S \cdot \tau) = \Delta p/\left[\mu \cdot \left(r_0 \cdot h_n + R_p \right) \right] .$$

Padarę pakeitimus, gausime:

$$V = \Delta p \cdot S \cdot \tau / \left[\mu \cdot \left(r_0 \cdot h_n + R_p\right)\right]. \qquad (10.73)$$

Ši lygtis vadinama filtravimo lygtimi, esant pastoviam slėgių skirtumui ir pastoviam filtravimo greičiui. Ji taip pat naudojama, kai susidaro tiek spūdžiosios, tiek nespūdžiosios nuosėdos.

Skaičiuojant pagal (10.71) ir (10.73) lygtis, būtina eksperimentiškai nustatyti filtravimo konstantų r_0, R_p ir x_0 vertes.

Konstantoms eksperimentiškai nustatyti (10.72) ir (10.73) filtravimo lygtys pertvarkomos. Tam tikslui visi lygčių nariai padalijami iš reiškinio $2 \cdot \Delta p \cdot S^2 \cdot V / \left(\mu \cdot r_0 \cdot x_0\right)$ ir kairioji bei dešinioji lygties pusės sukeičiamos vietomis:

$$\tau / V = \mu \cdot r_0 \cdot x_0 V / \left(2 \cdot \Delta p \cdot S^2\right) + \mu \cdot R_p / \left(\Delta p \cdot S\right). \qquad (10.74)$$

Pažymima:

$$\mu \cdot r_0 \cdot x_0 / \left(2 \cdot \Delta p \cdot S^2\right) = M, \qquad (10.75)$$

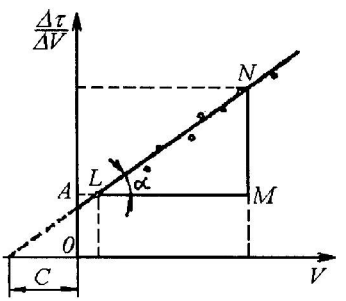
$$\mu \cdot R_p / \left(\Delta p \cdot S\right) = N. \qquad (10.76)$$

Kai slėgių skirtumas ir temperatūra yra pastovūs, visi dydžiai, įeinantys į (10.75) ir (10.76) lygčių dešiniąsias puses, yra pastovūs, todėl $M = const$ ir $N = const$.

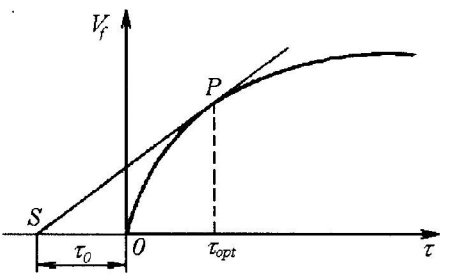
Atsižvelgdami į žymėjimus, (10.74) lygtį užrašysime taip:

$$\tau / V = M \cdot V + N. \qquad (10.77)$$

Ši lygtis rodo funkcijos τ / V tiesinę priklausomybę nuo surinkto filtrato tūrio V. Lygties koeficientas M yra tiesės pasvirimo kampo α į abscisių ašį tangentas, o dydis N – ordinatėje atkertama atkarpa OA (10.21 pav.).



10.21 pav. Funkcijos τ / V priklausomybė nuo filtrato tūrio V



10.22 pav. Optimalios filtravimo trukmės nustatymo grafikas

Dydžiai M ir N nustatomi eksperimentiškai, naudojant filtro modelį ir matuojant per filtravimo trukmę τ (nuo filtravimo pradžios) surinkto filtrato tūrį V, m^3/m^2. Eksperimentinius duomenis apdorojus mažiausiųjų kvadratų metodu, apskaičiuojamos M ir N vertės, o paskui pagal (10.75) ir (10.76) lygtis apskaičiuojami r_0 ir R_p. Be to, eksperimento metu matuojamas nuosėdų ant filtro tūris ir pagal santykį $x_0 = V_n/V$ apskaičiuojama x_0 vertė.

Filtruojant suspensiją, turinčią didelių dispersinių dalelių (keleto milimetrų dydžio), r_0 vertę galima apskaičiuoti pagal (10.76) lygtį, jei (10.58) lygtyje nepaisoma filtracinės pertvaros pasipriešinimo Rp:

$$w = \Delta p/(\mu \cdot r_0 \cdot h_n). \tag{10.78}$$

Iš čia

$$r_0 = \Delta p/(\mu \cdot h_n \cdot w). \tag{10.79}$$

Pagal (6.72) lygtį apskaičiuotą Δp vertę įrašius į (10.79) lygtį ir įvertinus tai, kad $H = h_n$ ir $w_0 = w$, gaunama:

$$r_0 = 150 \cdot (1-\varepsilon)^2/(\Phi^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot d^2). \tag{10.80}$$

Gali būti skaičiuojamas 1 m^2 ($S = 1$ m^2) filtracinės pertvaros filtravimas. Tariama, kad per 1 m^2 filtracinės pertvaros nuo filtravimo pradžios prateka V m^3 filtrato, o nuosėdų tūris proporcingas susidariusio filtrato tūriui V (pvz., tai gali būti tuo atveju, kada suspensijoje kietosios ir skystosios fazių tankiai lygūs arba labai artimi). Tada galima užrašyti:

$$R_n = k \cdot V; \tag{10.81}$$

čia k – proporcingumo koeficientas.

Panašiai galima išreikšti filtravimo pertvaros pasipriešinimą:

$$R_p = k \cdot C; \tag{10.82}$$

čia C – filtrato tūris, kuriam perėjus per 1 m^2 filtracinės pertvaros susidaro nuosėdų sluoksnis, kurio pasipriešinimas lygus filtracinės pertvaros pasipriešinimui. Kiekvienai pertvarai šis dydis yra pastovus ir nepriklauso nuo filtravimo sąlygų.

(10.81) ir (10.82) lygtis įrašę į (10.64) lygtį, gauname

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{k \cdot (V + C)}, \tag{10.83}$$

arba pertvarkę:

$$(V + C) \cdot dV = \frac{\Delta p}{k} \cdot d\tau . \qquad (10.84)$$

Laikant, kad filtravimo metu palaikomas pastovus slėgių skirtumas ($\Delta p = const$), suintegravus (10.84) lygtį, gaunama:

$$\frac{V^2}{2} + C \cdot V = \frac{\Delta p}{k} \cdot \tau + C_1 . \qquad (10.85)$$

Integravimo konstanta C_1 nustatoma pagal pradines filtravimo sąlygas: kai $\tau = 0$, $V = 0$, tai ir $C_1 = 0$.

Pažymėjus reiškinį $\frac{2 \cdot \Delta p}{k} = K$, gaunama tokia filtravimo lygtis:

$$V^2 + 2 \cdot V \cdot C = K \cdot \tau . \qquad (10.86)$$

(10.86) lygtis rodo per 1 m^2 filtracinės pertvaros pratekėjusio filtrato tūrio V priklausomybę nuo filtravimo trukmės. Norint apskaičiuoti filtro našumą, reikia šį tūrį padauginti iš filtravimo paviršiaus F.

Skaičiuojant nuolatinių filtrų našumą, reikia žinoti, kad tuo pačiu metu dirba ne visas paviršius, o tik jo dalis (pvz., apie 35 % viso būgninio filtro paviršiaus). Kitoje paviršiaus dalyje atliekamos pagalbinės operacijos: plaunamos, džiovinamos, šalinamos nuosėdos, valoma pertvara.

Skaičiuojant periodinio filtro našumą, iš (10.86) lygties nustatoma tik pačios filtravimo operacijos trukmė. Neįvertinama plovimo, džiovinimo, nuosėdų pašalinimo ir pertvaros išvalymo operacijos trukmė.

(10.86) lygties nariai C ir K vadinami filtravimo konstantomis. Jos nustatomos eksperimentiškai. Tam tikslui, kai $\Delta p = const$, periodiškai matuojamas filtrato tūris V ir filtravimo trukmė τ.

Išdiferencijavę (10.86) lygtį, gauname:

$$2 \cdot V \cdot dV + 2 \cdot C \cdot dV = K \cdot d \cdot \tau . \qquad (10.87)$$

Padaliję šią lygtį iš dV ir K, gauname:

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{2 \cdot V}{K} + \frac{2 \cdot C}{K} . \qquad (10.88)$$

Išvestinę $\frac{d\tau}{dV}$, kai $\Delta p = const$, galima pakeisti santykiu $\frac{\Delta \tau}{\Delta V}$:

$$\frac{\Delta \tau}{\Delta V} = \frac{2 \cdot V}{K} + \frac{2 \cdot C}{K} . \qquad (10.89)$$

Gauta lygtis rodo, kad tarp dydžių $\frac{\Delta\tau}{\Delta V}$ ir V yra tiesinė priklausomybė, kuri gali būti atvaizduota grafiškai (10.21 pav.). Grafikas brėžiamas pagal eksperimentinius duomenis ir iš jo nustatomos (10.88) lygties konstantos C ir K. Tiesė į abscisių ašį pasvirusi kampu α, kurio tangentas $tg\alpha = 2/K$. Atkarpa $OA = 2 \cdot C/K$. Tiesėje pasirenkame du taškus (pvz., L ir N). Atkarpos LM (ΔV) ir NM $(\Delta\tau/\Delta V)$ panaudojamos apskaičiuoti $tg\alpha = NM/LM$ ir $K = \frac{2}{(NM/LM)}$. Konstanta C apskaičiuojama pagal lygtį $C = OA \cdot K/2$.

Žinant C ir K vertes, apskaičiuojamos R_n ir R_p vertės.

Periodinio filtravimo ciklo didžiausio našumo grafinis nustatymas.

Periodinio filtravimo ciklą sudaro filtravimas ir pagalbinės operacijos (nuosėdų plovimas ir jų pašalinimas, filtravimo pertvaros paruošimas kitam ciklui).

Filtravimo našumas V_p, m^3/s, apskaičiuojamas taip:

$$V_p = \frac{V_f}{\tau + \tau_0}; \qquad (10.90)$$

čia V_f – per vieną ciklą susidaręs filtrato tūris, m^3; τ – filtravimo operacijos trukmė, s; τ_0 – pagalbinių operacijų trukmė, s.

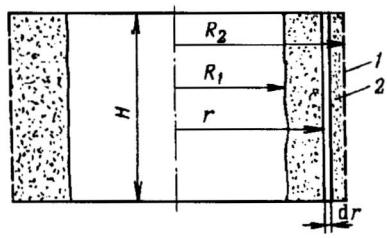
Praktiškai filtravimo cikle pagalbinių operacijų trukmė yra pastovus dydis, todėl našumo kitimas priklauso tik nuo filtravimo trukmės. Parinkus optimalią filtravimo trukmę, gaunamas didžiausias našumas. Optimalią filtravimo operacijos trukmę lengviausiai galima nustatyti grafiškai (10.22 pav.). Nubrėžiama kreivė, vaizduojanti filtrato tūrio kitimą filtruojant. Ašyje τ neigiama kryptimi atidedama pagalbinių operacijų trukmė τ_0 (taškas S). Iš gautojo taško S brėžiama filtravimo kreivės liestinė SP. Lietimosi taškas P atitinka didžiausią ciklo našumą. Nuleidę iš šio taško statmenį į abscisę τ, joje randame optimalią trukmę τ_{opt}.

Slėgių skirtumo abipus filtruojamosios centrifugos sienelės skaičiavimas. Kad geriau suprastume išcentrinį filtravimo procesą, išvesime šio proceso, vykstančio veikiant išcentrinei jėgai, matematinio aprašymo lygtį. Toks procesas vyksta filtruojamosiose centrifugose. Skirtingai nuo nusodinamųjų centrifugų, jos turi perforuotų sienelių būgną, kuris iš vidaus padengtas filtracine pertvara. Slėgių skirtumas abipus filtracinės pertvaros, sukantis būgnui, atsiranda veikiant išcentrinei jėgai. Filtravimo metu kietoji fazė pasilieka ant filtracinės pertvaros, sudarydama nuosėdų sluoksnį, o filtratas pašalinamas iš būgno. Suspensijų perskyrimas filtruojamosiose centrifugose sąlygiškai skirs-

tomas į tris stadijas: nuosėdų susidarymo, jų sutankinimo ir mechaninio džiovinimo nuspaudžiant. Ribos tarp stadijų sąlyginės, pvz., nuosėdos tankinamos ir formuojantis jų sluoksniui.

Slėgių skirtumui abiejose filtracinės pertvaros pusėse nustatyti panagrinėsime cilindrinį būgną, kurio aukštis H ir spindulys R_2 (10.24 pav.). Suspensijos sluoksnyje išskiriamas elementarus žiedas, kurio spindulys r ir storis dr. Suspensijos elementariojo žiedo masė apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$dm = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H \cdot \rho_{miš} \cdot dr . \qquad (10.91)$$



10.23 pav. Filtruojamosios centrifugos būgno su suspensijos sluoksniu schema: *1* – būgno sienelė, *2* – suspensija

Elementaraus žiedo formos suspensijos masę veikianti išcentrinė jėga $dG_{išc}$ gali būti apskaičiuota taip:

$$dG_{išc} = dm \cdot w_r^2 / r = dm \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot n)^2 / r ; \qquad (10.92)$$

čia w_r – suspensijos, nutolusios nuo būgno centro atstumu r, apskritiminis greitis; n – sukimosi dažnis.

Į (10.91) lygtį įrašę (10.90) lygtį ir pertvarkę, gauname:

$$dG_{išc} = 8 \cdot \pi^3 \cdot H \cdot \rho_{miš} \cdot n^2 \cdot r^2 \cdot dr . \qquad (10.93)$$

Slėgio pokytis sluoksnyje dr apskaičiuojamas, išcentrinę jėgą padalijus iš paviršiaus, kurį ji veikia, ploto. Šis plotas lygus $2 \cdot \pi \cdot r \cdot H$. Tada

$$dp = 8 \cdot \pi^3 \cdot H \cdot \rho_{miš} \cdot n^2 \cdot r^2 \cdot dr / (2 \cdot \pi \cdot r \cdot H) = 4 \cdot \pi^2 \cdot \rho_{miš} \cdot n^2 \cdot r \cdot dr . \qquad (10.94)$$

Filtracinę pertvarą veikiantis slėgių skirtumas apskaičiuojamas suintegravus gautąją lygtį nuo suspensijos vidinio spindulio R_1 iki išorinio R_2:

$$\Delta p = 4 \cdot \pi^2 \cdot \rho_{miš} \cdot n^2 \cdot (R_2^2 - R_1^2) / 2 = 2 \cdot \pi^2 \cdot \rho_{miš} \cdot n^2 \cdot (R_2^2 - R_1^2). \qquad (10.95)$$

Pramoninėse filtruojamosiose centrifugose Δp vertė dažniausiai lygi 1...1,5 MPa. Esant tokiems dideliems slėgiams, spūdžiosios nuosėdos labai sutankėja ir jų hidraulinis pasipriešinimas srautui tampa gana didelis. Todėl

filtruojamosiomis centrifugomis nerekomenduojama perskirti suspensijas, iš kurių gaunamos labai spūdžios nuosėdos.

Tyrimais įrodyta, kad kinetinės filtravimo (10.71) ir (10.73) lygtys gali būti naudojamos nuosėdų susidarymo stadijai skaičiuoti tik daliniais atvejais:

1) kai susidariusių nuosėdų tūris proporcingas filtrato tūriui (tai būna tuo atveju, kai suspensijos kietosios ir skystosios fazių tankiai lygūs arba labai artimi);

2) kai nuosėdos susidaro labai greitai dėl nusodinimo išcentrinė jėga. Antrajai ir trečiajai centrifugavimo stadijoms neturime matematinių lygčių, kurios bent patenkinamai aprašytų filtravimo kinetiką. Todėl optimali išcentrinio centrifugavimo trukmė dažniausiai nustatoma bandymais.

10.3.1. Filtrai

Pagal darbo režimą filtrai ir filtruojamosios centrifugos skirstomi į periodinius ir nuolatinius. Ir vieni, ir kiti pramonėje plačiai taikomi, kai ant filtracinės pertvaros susidaro nuosėdos. Filtravimui, kurio metu nuosėdos patenka į filtracinės pertvaros poras, galima naudoti tik periodinius filtrus.

Nuolatiniais filtrais filtruojama esant pastoviam slėgių skirtumui (nuosėdų praplovimo atveju ir esant pastoviam filtravimo greičiui). Periodiniais filtrais filtruojama bet kuriuo režimu.

Pagal slėgių skirtumo sudarymą skiriami vakuuminiai ir slėginiai filtrai. Vakuuminiuose filtruose po filtracine pertvara sudaromas vakuumas, o slėginiuose filtruose virš filtracinės pertvaros sudaromas viršslėgis. Slėginiai filtrai naudotini, kada nuosėdos yra mažai spūdžios, bet turi didelį hidraulinį pasipriešinimą. Kitais atvejais patariama naudoti vakuuminius filtrus, nes jų konstrukcija paprastesnė.

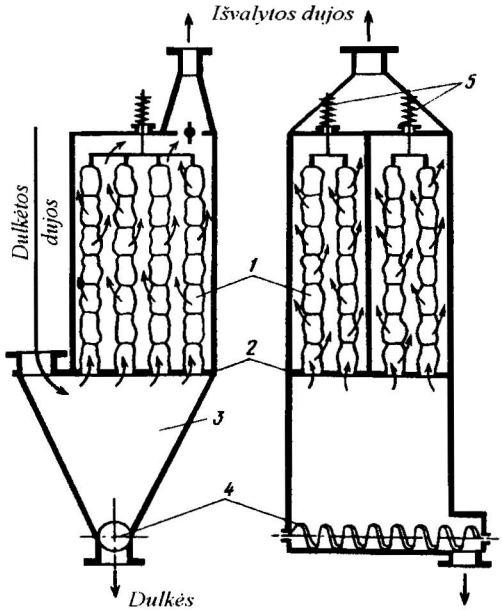
Pagal sunkio jėgos ir filtrato judėjimo kryptis skiriami sutampančių, priešingų ir statmenų krypčių filtrai.

Pramoniniai filtrai. Pagal filtracinę pertvarą skiriamos tokios filtrų grupės: a) su lanksčiomis akytosiomis pertvaromis iš gamtinio, sintetinio ir mineralinio pluošto, neaustinių pluoštinių medžiagų (veltinio, kartono ir kt.), metalinių audinių ir kt.; b) su pusiau standžiomis akytosiomis pertvaromis (plaušelių, metalinių tinklelių ir kt. sluoksnis); c) su standžiomis akytosiomis pertvaromis (iš sukepintų keraminių, plastikinių arba supresuotų metalo miltelių); d) su grūdinių medžiagų pertvaromis (kokso, žvyro, smėlio ir kt. sluoksnis).

Filtracinė pertvara parenkama pagal dispersinių dalelių dydį, dujų temperatūrą, jų chemines savybes, taip pat pagal leistinus hidraulinius nuostolius filtre.

Rankoviniai filtrai. Dujinėms nevienalytėms sistemoms filtruoti dažniausiai naudojami rankoviniai filtrai, kurie priskiriami prie filtrų su lanksčia akytaja filtracine pertvara. Rankovinį filtrą (10.24 pav.) sudaro korpusas, ku-

riame yra audeklo maišai–rankovės *1*. Rankovių atviri apatiniai galai pritvirtinti prie rėtinės pertvaros *2* (atvamzdžių), o uždari viršutiniai galai – prie bendro rėmo. Dulkės pro atvamzdį tiekiamos į kamerą *3*. Iš jos dulkėtos dujos patenka į rankoves *1*. Dujos, praėjusios pro rankovių audinio skylutes, išpučiamos arba ištraukiamos pro viršutinį atvamzdį. Dažniausiai realių procesų metu dujos išsiurbiamos, nes tokiu atveju mažiau dulkių patenka į aplinką. Kietos smulkios dalelės nusėda ant rankovių vidinio paviršiaus ir audeklo porose, todėl padidėja rankovių hidraulinis pasipriešinimas. Pasipriešinimui pasiekus didžiausią leistiną vertę, rankovės periodiškai sukratomos mechanizmu *5* ir sulaikytos kietosios dalelės subyra į kameros *3* dugną. Čia jos patenka ant sraigtinio transporterio *4* ir pašalinamos iš filtro. Nenutrūkstamam dujų valymui užtikrinti rankoviniai filtrai gaminami kelių (4, 8, 12 ir t. t.) sekcijų: vienose sekcijose dulkės filtruojamos, o kitose regeneruojamos rankovės. Kiekviena sekcija yra tarsi periodinis aparatas, kuriame nuosekliai vykdomos filtravimo, rankovių supurtymo, rankovių prapūtimo operacijos.



10.24 pav. Rankovinis filtras: *1* – rankovės su stangrumo žiedais, *2* – rėtinė plokštė, *3* – kietųjų dalelių iškrovimo kamera, *4* – sraigtinis transporteris, *5* – rankovių sukratymo mechanizmas

Rankovių audinio skylutėse įstrigusioms dulkėms pašalinti oras į filtrą tiekiamas iš priešingos rankovių pusės. Tam, kad rankovės prapūtimo metu

nesubliūkštų, jose įrengti stangrumo žiedai, kurie, kaip ir prapūtimo oro tiekimo žiedai, judantys rankovių išoriniu paviršiumi, schemoje neparodyti.

Rankovės dažniausiai gaminamos iš medvilninio, vilnonio arba sintetinio audeklo. Prapūtimo oro aukščiausia temperatūra priklauso nuo audeklo terminio atsparumo. Mažiausia tiek valomų, tiek rankoves prapučiančių dujų temperatūra turi būti 10 °C aukštesnė už rasos taško temperatūrą, antraip audinys sudrėksta, greitai užsikemša ir jo hidraulinis pasipriešinimas labai padidėja.

Rankoviniai filtrai naudojami, kai reikia atskirti sausas, chemiškai neagresyvias, didesnes kaip 2 μm kietąsias daleles. Išvalymo laipsnis siekia 99 %.

Didžiausi rankovinių filtrų trūkumai: didelis hidraulinis pasipriešinimas (iki 2500 Pa), palyginti greitai susidėvi audeklas ir užsikemša poros, netinka valyti drėgnoms, taip pat aukštų temperatūrų dujoms. Šių trūkumų įtaka sumažinama, naudojant filtracines pertvaras iš metalų, keramikos arba kitų termiškai atsparių medžiagų.

Rankovinių filtrų skaičiavimas. Rankovinių filtrų filtruojamojo paviršiaus plotas apskaičiuojamas pagal lygtį

$$F = \frac{V_s}{w_s \cdot \eta};$$

čia F – filtruojamojo paviršiaus plotas, m^2; V_s – filtro našumas, m^3/s; w_s – filtro našumas nuo vieno kvadratinio metro filtruojamojo paviršiaus (arba fiktyvusis greitis), $m^3/(m^2 \cdot s)$; η – naudingumo koeficientas, priklausantis nuo paviršiaus darbo tolygumo.

Fiktyvusis filtravimo greitis w_s dažniausiai būna 0,02...0,06 $m^3/(m^2 \cdot s)$. Šis dydis nustatomas bandymais ir priklauso nuo rankovių medžiagos, dispersinių dalelių dydžio ir formos, dujų temperatūros ir kitų veiksnių.

Rankovių skaičius n apskaičiuojamas taip:

$$n = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot L}; \qquad (10.96)$$

čia D – rankovės skersmuo (dažniausiai 0,18...0,22 m); L – rankovės ilgis (2...3,5 m). Paprastai rankovių skersmens ir ilgio santykis būna nuo 1/15 iki 1/20.

Slėgio nuostoliai rankoviniuose filtruose apskaičiuojami pagal lygtį

$$\Delta p = A \cdot w_s^k;$$

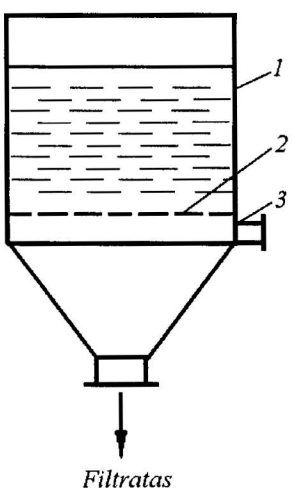
čia Δp – slėgio nuostoliai, Pa; A – koeficientas, priklausantis nuo filtravimo audinio tankumo, užterštumo ir susidėvėjimo; w_s – fiktyvusis greitis $m^3/(m^2 \cdot s)$; k – nuo filtravimo audinio ir dujų srauto užterštumo priklausantis laipsnio rodiklis.

Slėgio nuostoliai rankoviniuose filtruose būna 250...500 Pa, bet labai užsiteršus audiniui jie gali padidėti 2...3 kartus.

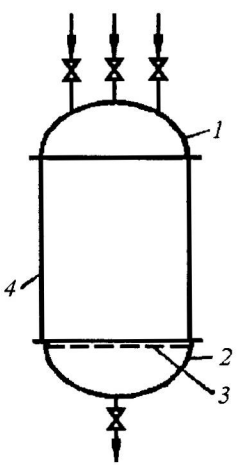
Filtrai, kuriais perskiriamos suspensijos, klasifikuojami taip: 1) pagal darbo organizavimą (periodiniai ir nuolatiniai); 2) pagal priešingose pertvaros pusėse sudaromą slėgių skirtumą (vakuuminiai ir slėginiai). Slėginiai dar skirstomi į tokius, kuriuose slėgis virš pertvaros susidaro dėl suspensijos sluoksnio hidrostatinio slėgio, ir tokius, kuriuose slėgis virš pertvaros sudaromas kompresoriais ir siurbliais; 3) pagal sunkio jėgos veikimo ir filtrato judėjimo kryptis (a – filtrai, kuriuose šios kryptys sutampa; b – kryptys priešingos ir c – kryptys statmenos); 4) pagal konstrukcijos ypatybes (siurbiamieji filtrai (nutčfiltrai), lakštiniai filtrai, filtrpresai, būgniniai filtrai, juostiniai filtrai, diskiniai filtrai ir kt.).

Susipažinsime tik su keliais dažniausiai pramonėje naudojamų tipų filtrais.

Atvirąjį hidrostatinio slėgio siurbiamąjį filtrą (10.25 pav.) sudaro cilindrinis arba stačiakampis rezervuaras *1*, kurio viduje yra tam tikro audinio arba kieta filtravimo pertvara *2*. Plaušinė arba audinio filtruojamoji medžiaga paklojama ant metalinės skylėtos plokštės. Atvirųjų siurbiamųjų filtrų slėgių skirtumas priešingose pertvaros pusėse priklauso nuo suspensijos sluoksnio storio ir būna iki 50 kPa.



10.25 pav. Atvirasis siurbiamasis filtras: *1* – rezervuaras, *2* – filtracinė pertvara, *3* – atvamzdis, sujungtas su vakuuminiu siurbliu



10.26 pav. Uždarasis siurbiamasis filtras: *1* – dangtis, *2* – dugnas, *3* – filtracinė pertvara, *4* – rezervuaras

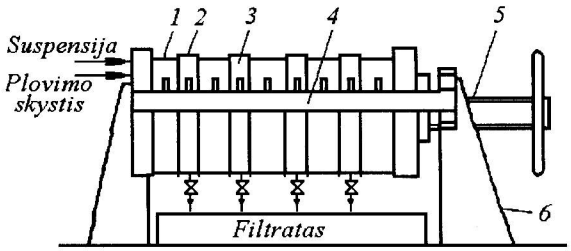
Pagal konstrukciją tie patys atvirieji siurbiamieji filtrai gali būti naudojami kaip vakuuminiai siurbiamieji filtrai. Slėgio skirtumui padidinti, po filtracine pertvara sudaromas vakuumas. Tam atvamzdis *3* būna sujungtas su vakuuminiu siurbliu.

Uždarieji siurbiamieji filtrai (10.26 pav.) paprastai yra slėginiai. Jais filtruojamos lakiosios, degiosios ir nuodingosios suspensijos. Tokių filtrų rezervuarai *4* yra sandariai uždengti. Dangtyje *1* įtaisomi trys atvamzdžiai. Pro vieną iš jų tiekiama suspensija, pro kitą kompresoriumi pučiamas suslėgtas oras (norint padidinti slėgių skirtumą), o pro trečiąjį baigus filtruoti išleidžiamas oras. Dangtyje būna dar du papildomi atvamzdžiai: pro vieną jų grąžinamas dar kartą filtruoti drumzlinas filtratas, o pro antrą tiekiamas švarus skystis nuosėdoms plauti. Nuosėdos kartu su filtracine pertvara *3* pašalinamos atidarius filtro dugną *2*.

Hidrostatiniuose, vakuuminiuose ir kompresoriniuose filtruose dažniausiai palaikomas pastovus slėgių skirtumas. Kintamas slėgių skirtumas susidaro tuose filtruose, kuriuose tie patys siurbliai tiekia suspensiją ir didina slėgį.

Visi siurbiamieji filtrai yra periodiniai. Filtrato tekėjimo kryptis juose sutampa su sunkio jėgos kryptimi.

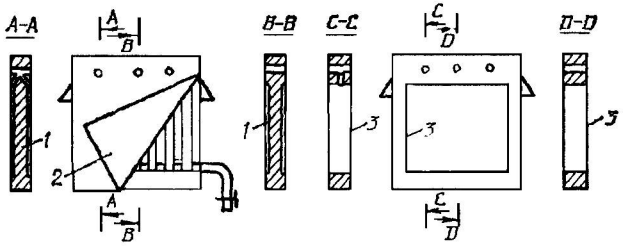
Filtrpresai. Pagal tai, kaip įrengti filtravimo elementai, filtrpresai skirstomi į rėminius ir kamerinius.



10.27 pav. Rėminis filtrpresas:
1 – rievėtoji plokštė, *2* – filtravimo audinys, *3* – rėmas, *4* – strypas, *5* – sraigtas, *6* – stovas

Rėminis filtrpresas (10.27–10.29 pav.) priskiriamas prie slėginių periodinių filtrų. Tokį filtrą sudaro komplektas stačiakampių rievėtų plokščių *1* ir rėmų *3*, tarp kurių suspaudžiamas filtravimo audinys *2*. Toks filtravimo elementų komplektas sumontuojamas ant dviejų horizontalių strypų *4*, pritvirtintų prie stovo *6*, ir suveržiamas sraigtu *5* arba hidrauliniu prispaudikliu. Suspensija siurbliu tiekiama į centrinį kanalą, o iš jo pro rėmo *3* angą patenka į ertmę, kurią riboja rėmas ir dvi šoninės plokštės. Filtratas, prasisunkęs pro audinį *2*, rievėtos plokštės *1* grioveliais nuteka žemyn. Nuosėdos lieka ant filtravimo audinio. Ertmių, kurios vadinamos kameromis, yra tiek, kiek rėmų.

Taigi rėminis filtrpresas yra daugiakameris filtras. Filtruojama tol, kol nuosėdų prisipildo visa kamera. Toliau, jei reikia, nuosėdos plaunamos ir, išardžius presą, iškraunamos rankomis. Filtravimo audinys išplaunamas ir filtrpresas vėl surenkamas.

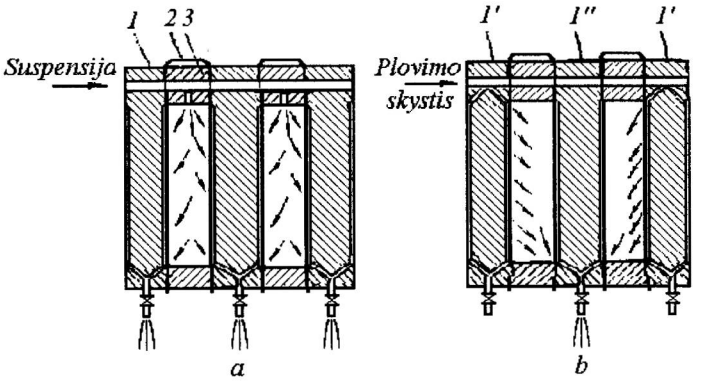


10.28 pav. Rėminio filtrpreso filtravimo elementai:
1 – rievėtoji plokštė, *2* – filtravimo audinys, *3* – rėmas

Kaip nuosėdos plaunamos rėminiame filtrprese, parodyta 10.29 paveiksle. Skystis nuosėdoms plauti į filtrpreso (10.29 pav., *b*) rievėtąsias plokštes tiekiamas dviem šoniniais išilginiais kanalais. Surenkant elementus į komplektą, rievėtosios plokštės dedamos pakaitomis. Taip surinkus plokštes, tarp dviejų plokščių, turinčių viršutinėje dalyje kanaliukus, jungiančius išilginį skysčio tiekimo kanalą su rievėtosios plokštės paviršiaus grioveliais, į kuriuos tiekiamas plovimo skystis, turi būti trečioji plokštė, turinti panašius kanaliukus apatinėje dalyje, kuriais plovimo skystis patenka į jos apačioje esantį atvamzdį ir iš jo yra išleidžiamas. Todėl rievėtosios plokštės esti dviejų rūšių – *1′* ir *1″*. Surenkant filtravimo elementus į komplektą, jos dedamos pakaitomis. Nuosėdų plovimo skystis tiekiamas per plokštę *1′*, o išteka per tarpinę plokštę *1″*.

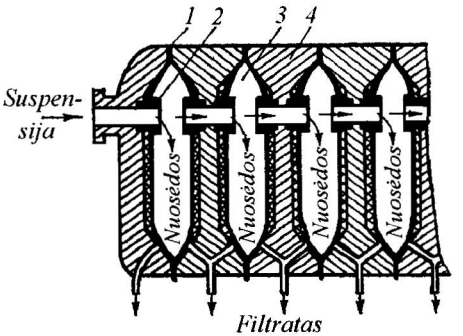
Sunkio jėgos ir filtrato judėjimo kryptys rėminiame filtrprese yra statmenos. Plokščių paviršius rifliuotas, todėl filtravimo audinys mažiau prilimpa ir gali nutekėti filtratas. Tuščiaviduris rėmas, esantis tarp dviejų plokščių, sudaro nuosėdų kamerą. Tarp rėmų *3* ir plokščių *1* dedamas filtravimo audinys *2* ir jame išpjaunamos angos, sutampančios su plokščių ir rėmų angomis, todėl susidaro kanalas suspensijai arba plovimo skysčiui tiekti (10.28 pav.).

Rėminio filtrpreso pranašumas tas, kad gerai atskiriamos net ir smulkiausios kietosios medžiagos dalelės. Nuosėdos būna švarios ir gana sausos. Tačiau surenkant filtrpresą ir iškraunant nuosėdas reikia daug rankų darbo.



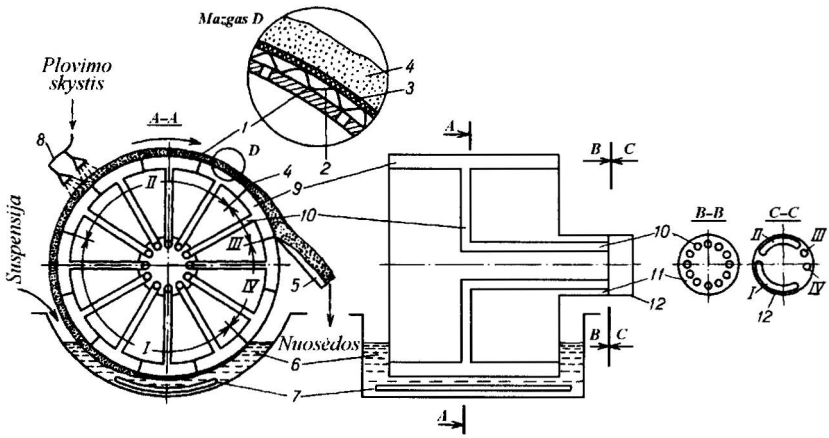
10.29 pav. Rėminio filtrpreso veikimo schema:
a – filtravimas (pjūvis eina per centrinio kanalo ašį), *b* – nuosėdų plovimas (pjūvis eina per šoninio kanalo ašį); *1* – rievėtoji plokštė, *2* – filtravimo audinys, *3* – rėmas

Kameriniai filtrpresai (10.30 pav.) veikia taip pat kaip rėminiai, tik visi jų filtravimo elementai yra vienodi. Du sujungti elementai (rievėtosios plokštės) *4* sudaro filtravimo kamerą *3*. Kamerų vidus išklotas filtravimo audiniu *1*. Prie suspensijos įleidimo angų jis pritvirtintas specialiais atvamzdžiais *2*. Filtrpresuose nuosėdų sunkio jėgos kryptis statmena filtrato judėjimo krypčiai. Filtrpresų didžiausia teigiamybė – didelis filtravimo paviršius (iki 140 m^2). Trūkumai – periodinis veikimas ir daug rankų darbo, be to, į kamerinį filtrpresą įdėti filtravimo audinį yra daug sunkiau negu į rėminį.



10.30 pav. Kamerinio filtrpreso veikimo schema:
1 – filtravimo audinys, *2* – audinio tvirtinimo atvamzdis, *3* – kamera, *4* – rievėtoji plokštė

Iš nuolatinių filtrų labiausiai paplitę *būgniniai vakuuminiai filtrai.* Tokio filtro schema pavaizduota 10.31 paveiksle.



10.31 pav. Būgninis vakuuminis filtras:
1 – būgnas skylėtu paviršiumi, *2* – banguotasis tinklas, *3* – filtracinė pertvara, *4* – nuosėdos, *5* – nuosėdų šalinimo peilis, *6* – suspensijos rezervuaras, *7* – svyruojamasis maišiklis, *8* – plovimo skysčio tiekimo mazgas, *9* – būgno kamera, narvelis, *10* – jungiamieji vamzdžiai, *11* – skirstomosios galvutės besisukančioji dalis, *12* – skirstomosios galvutės nejudamoji dalis; *I* – filtravimo ir filtrato išleidimo zona, *II* – nuosėdų plovimo ir plovimo vandens išleidimo zona, *III* – nuosėdų šalinimo zona, *IV* – filtravimo audinio valymo (regeneracijos) zona

Filtras turi cilindrinį skylėtą būgną *1*, padengtą „banguotu" metaliniu tinklu *2*, ant kurio uždedamas filtravimo audinys *3*. Būgnas turi dvigubas sieneles, tarp kurių esanti erdvė radialinėmis pertvaromis padalijama į kelias tarpusavyje nesujungtas kameras *9*. Kiekviena kamera vamzdeliu *10* sujungta su skirstomosios galvutės besisukančia dalimi *11*. Sukantis būgnui kameros nustatytu nuoseklumu prisijungia prie skirstomosios galvutės nejudamosios dalies *12* kanalų (žr. 10.31 pav., pjūvis *C–C*; *I*, *II*, *III* ir *IV*). Per vieną būgno apsisukimą kiekviena jo kamera pereina kelias zonas, kuriose vyksta filtravimo, nuosėdų plovimo, nuosėdų šalinimo ir filtravimo audinio valymo procesai. 30...40 % būgno paviršiaus panardinta į suspensiją. Svyruojamasis maišiklis *7* neleidžia kietosioms dalelėms nusėsti ant suspensijos rezervuaro dugno.

Suspensija perskiriama *I* zonoje, kuri vadinama filtravimo ir filtrato nusiurbimo zona. Joje kamera panardinama į suspensiją. Šiuo metu kamera yra sujungta su vakuumo linija. Vakuumo veikiamas filtratas pro filtravimo audinį, tinklelį, perforuotą būgno korpusą nusiurbiamas į kameros vidų ir pro

vamzdelį išleidžiamas iš aparato. Ant filtravimo audiniu padengto išorinio būgno paviršiaus susidaro nuosėdos *4*. Būgnui sukantis, nuosėdų sluoksnis patenka į *II* zoną, kuri vadinama nuosėdų plovimo ir nuosėdas plovusio vandens nusiurbimo zona. Kamera, iškilusi iš suspensijos rezervuaro, sujungiama su kita vakuumo linija, o ant nuosėdų per aparato mazgą *8* tiekiamas plovimo skystis. Jis pereina per nuosėdas ir vamzdeliu išleidžiamas iš aparato. Išplautos nuosėdos patenka į *III* zoną – nuosėdų šalinimo zoną. Nuosėdos zonos pradžioje dar padžiovinamos vakuumu, o po to kamera prisijungia prie suslėgto oro linijos. Oras ne tik džiovina, bet ir supurena nuosėdas, todėl lengviau jas nuimti. Kamerai su padžiovintomis nuosėdomis artėjant prie peilio *5*, suslėgto oro tiekimas nutraukiamas. Nuosėdos nuo filtravimo paviršiaus nužeriamos peiliu ir nukrinta veikiamos sunkio jėgos. Peilis taip pat nukreipia nuosėdas ant transporterio.

IV zona skirta filtravimo audiniui valyti arba regeneruoti. Šioje zonoje filtravimo audinys prapučiamas suslėgtu oru arba vandens garais ir pašalinamos ant jo likusios kietosios dalelės.

Tada kamera su regeneruotu filtravimo audiniu iš naujo patenka į suspensijos rezervuarą ir visas operacijų ciklas kartojamas.

Taigi kiekvienoje filtravimo paviršiaus dalyje visos operacijos atliekamos nuosekliai viena po kitos, tačiau atskiras kameras dengiantys filtravimo audinio ploteliai dirba nepriklausomai vienas nuo kito ir todėl visos operacijos atliekamos tuo pačiu metu, t. y. procesas vyksta nepertraukiamai. Filtro teigiamybės: paprasta priežiūra, galima filtruoti daug kietosios fazės turinčias suspensijas, geros nuosėdų plovimo sąlygas. Trūkumai: palyginti nedidelis savitasis filtravimo paviršius, filtrai yra palyginti brangūs, sunku juos hermetizuoti, dėl nusėdančių dalelių suspensiją rezervuare *6* būtina maišyti.

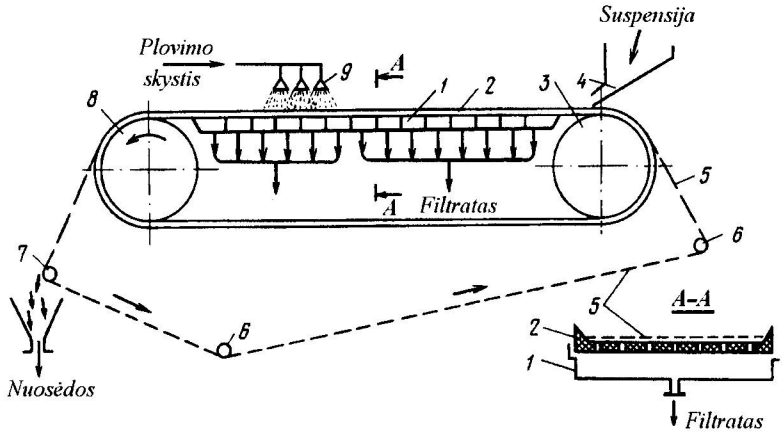
Juostinis vakuuminis filtras yra nuolatinis filtras, kuriame sunkio jėgos ir filtrato judėjimo kryptys sutampa. Filtro schema pavaizduota 10.32 paveiksle.

Perforuotoji guminė juosta *2* nenutrūkstamai juda apie varantįjį *8* ir įtempimo arba varomąjį *3* būgnus. Filtravimo audinys *5* prie juostos prispaudžiamas įtempiant jį ritinėliais *6* ir dėl trinties juda kartu su ja. Iš latako *4* ant filtravimo audinio tiekiama suspensija. Filtratas nusiurbiamas į žemiau juostos esančias vakuumo kameras *1* ir pašalinamas iš aparato. Ant filtravimo audinio susidaręs nuosėdų sluoksnis plaunamas iš purkštuvų *9* tiekiamu skysčiu. Plovimo skystis, nusiurbtas į kitas vakuumo kameras, taip pat išleidžiamas iš aparato.

Nuosėdos padžiovinamos vakuumu ir, juostai sulinkus per velenėlį *7*, atsiskiria nuo audinio ir nukrinta į bunkerį. Kai kuriuose juostiniuose filtruose nuosėdos nužeriamos peiliais. Audeklo juosta tarp ritinėlių *6* regeneruojama, nuvaloma mechaniniais šepečiais ir nuplaunama vandeniu.

Jeigu pradėjus filtruoti smulkios suspensijos dalelės prasiskverbia pro filtravimo audinį, tai drumzlinas filtratas grąžinamas atgal ant filtravimo juostos

virš antrosios vakuumo kameros *1*. Prieš tai ant filtravimo juostos susidaręs nuosėdų sluoksnis sulaiko smulkiąsias suspensijos daleles ir į vakuumo kamerą patenka skaidrus filtratas. Vakuumo kameroje taip pat surenkamas plovimo skystis. Nuosėdos lataku byra į bunkerį.



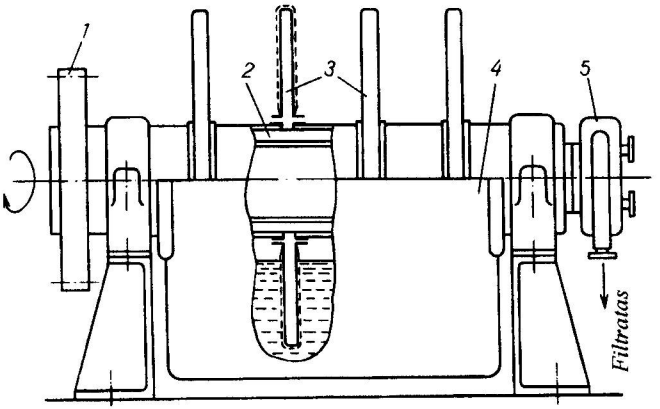
10.32 pav. Juostinis vakuuminis filtras: *1*– vakuuminės kameros, *2* – perforuotoji juosta, *3* – varomasis būgnas, *4* – suspensijos tiekimo latakas, *5* – filtravimo audinys, *6* – įtempimo ritinėliai, *7* – juostos užlenkimo velenėlis, *8* – varantysis būgnas, *9* – plovimo skysčio purkštuvai

Prie juostinių filtrų teigiamybių, be anksčiau minėto suspensijos sunkio jėgos ir filtrato judėjimo krypčių sutapimo, yra priskiriama paprasta konstrukcija (nėra specialios skirstomosios galvutės), geros nuosėdų plovimo ir džiovinimo sąlygos. Kadangi paprasta nuimti nuosėdas ir regeneruoti filtravimo audeklą, tai šiuo filtru galima filtruoti sunkiai filtruojamas medžiagas.

Trūkumais laikomas nedidelis savitasis paviršius (filtravimo paviršius, tenkantis 1 m^3 aparato) ir greitas filtravimo audeklo nusidėvėjimas. Be to, aparatas griozdiškas, sunku užsandarinti vakuumo kameras.

Diskinis vakuuminis filtras. Tai būgninis vakuuminis filtras, kurio filtravimo paviršiui padidinti įrengti diskai su šoniniais filtravimo paviršiais (10.33 pav.).

Vertikalūs diskai *3* pritvirtinti prie horizontalaus besisukančio tuščiavidurio būgno *2*. Kiekvienas diskas abiejose pusėse turi rifliuotą paviršių, padengtą filtravimo audiniu. Diskai iki pusės panardinti į suspensijos indą *4*. Vakuumo veikiamas filtratas patenka į diskų vidų ir disko paviršiaus latakais patenka į tuščiavidurio veleno ertmę. Ant vieno veleno galo įtaisyta skirstomoji galvutė *5* (kaip ir būgniniame vakuuminiame filtre), ant kito – pavara. Nuo filtravimo audinio nuosėdos pašalinamos 10.33 pav. neparodytais peiliais.



10.33 pav. Diskinis vakuuminis filtras: *1* – pavara, *2* – tuščiaviduris būgnas, *3* – diskai su šoniniais filtravimo paviršiais, *4* – suspensijos indas, *5* – skirstomoji galvutė

Tokiuose filtruose nuosėdos neplaunamos ir už filtravimo zonos yra nuosėdų džiovinimo ir apipūtimo oru zonos.

Pagrindinė filtro teigiamybė – didelis savitasis filtravimo paviršius. Trūkumai: juos būtina hermetizuoti ir galima naudoti tik tais atvejais, kai nereikia plauti gautų nuosėdų.

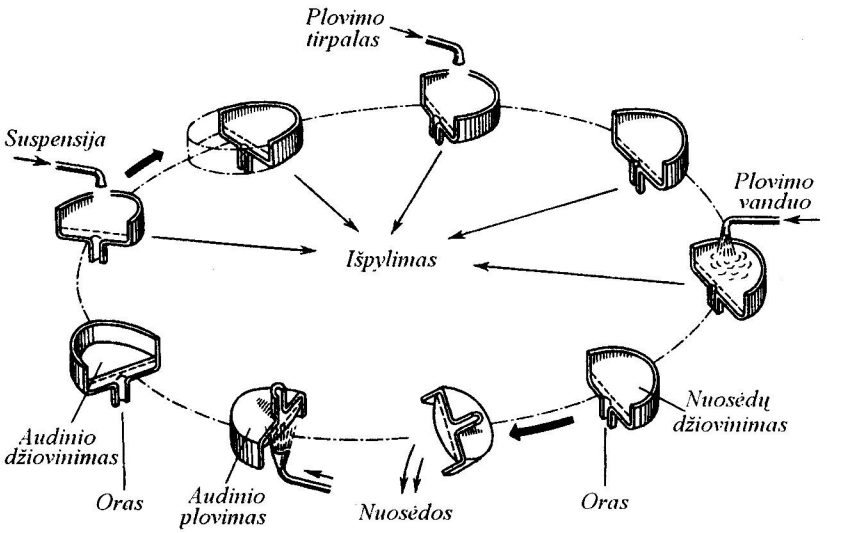
Karuselinis vakuuminis filtras. Filtras yra nuolatinis ir turi visas siurbiamųjų filtrų teigiamybes. Filtro schema pavaizduota 10.34 paveiksle. Filtras sudarytas iš keleto horizontalių siurbiamųjų filtrų. Siurbiamieji filtrai išdėstyti apskritimu ir lanksčiomis žarnelėmis sujungti su skirstomuoju įrenginiu, analogišku būgninio arba diskinio vakuuminių filtrų paskirstymo galvutėms. Sukantis rėmui, į kurį remiasi siurbiamieji filtrai, kiekvienas iš jų nuosekliai pereina užpildymo suspensija, filtravimo, nuosėdų plovimo, džiovinimo, nuėmimo bei filtravimo audinio plovimo ir džiovinimo stadijas. Šalinant nuosėdas siurbiamieji filtrai apverčiami ir išplovus filtravimo audinį grąžinami į pradinę padėtį.

Filtro teigiamybės: galima kruopščiai išplauti nuosėdas, filtravimo audinys ilgai laiko, nes nereikia jo įtempti ir nėra peilio, sutampa filtravimo ir nusodinimo kryptys.

Trūkumai: griozdiškumas, didelės metalo sąnaudos jo gamybai, sunku hermetizuoti.

Filtrų parinkimas. Filtrai parenkami fizikinio modeliavimo metodu. Pirmiausia atliekami bandymai su mažų matmenų filtrais. Bandant parenkama filtracinė pertvara: ji turi būti mechaniškai, chemiškai ir termiškai pakankamai atspari, kad būtų gaunamas švarus filtratas. Pertvaros savybės kartais lemia ir parenkamų filtrų konstrukciją. Remiantis bandymų duomenimis, apytiksliai

apskaičiuojamos filtravimo konstantos C ir K. Pagal jas sudaroma filtravimo kinetinė lygtis ir atliekami skaičiavimai.



10.34 pav. Karuselinio vakuuminio filtro veikimo schema

Filtrų darbo pobūdis priklauso nuo našumo: nedideliems suspensijų kiekiams filtruoti naudojami periodiniai filtrai, dideliems – nuolatiniai. Jeigu nuosėdų susidarymo greitis mažesnis kaip 0,7 mm/min, nuolatiniai filtrai tokioms suspensijoms atskirti netinka. Dažnai filtrų darbo pobūdis priklauso nuo proceso technologinio režimo: tas pats filtras vienu atveju veikia periodiniu, kitu atveju – nuolatiniu režimu.

Vakuuminiai filtrai naudojami, kai, sudarius $0{,}8 \cdot 10^5$ Pa vakuumą, nuosėdų sluoksnio susidarymo greitis yra didesnis kaip 0,5 mm/min. Jei nuosėdos susidaro lėčiau, naudojami slėginiai filtrai.

Filtrų skaičiavimas. *Skaičiuojant periodinius filtrus*, apskaičiuojamas filtro našumas, kai yra žinomas filtravimo paviršiaus plotas, arba apskaičiuojamas filtravimo paviršiaus plotas, reikalingas tam tikram suspensijos kiekiui perskirti.

Vieno filtro našumas V_{vid}, kai jo darbo metu palaikomas pastovus slėgių skirtumas abiejose filtracinės pertvaros pusėse, gali būti apskaičiuotas taip.

(10.71) lygtį išsprendžiame filtravimo trukmės τ atžvilgiu:

$$\tau = \left(\frac{V}{S}\right)^2 \cdot \frac{\mu \cdot r_0 \cdot x_0}{2 \cdot \Delta p} + \frac{V \cdot R_p \cdot \mu}{S \cdot \Delta p}. \qquad (10.97)$$

Kadangi nežinomas per trukmę τ surinktas filtrato tūris V, tai (10.97) lygtį perrašome, atsižvelgdami į tai, kad $V/S = h_n/x_0$ ((10.66) lygtis):

$$\tau = \left(\frac{h_n}{x_0}\right)^2 \cdot \frac{\mu \cdot r_0 \cdot x_0}{2 \cdot \Delta p} + \frac{h_n \cdot R_p \cdot \mu}{x_0 \cdot \Delta p}. \qquad (10.98)$$

Daugeliu atvejų filtravimo trukmė yra sąlygojama būtinybės gauti nurodyto storio nuosėdų sluoksnį, priklausantį nuo filtro konstrukcijos ir kitų veiksnių. Skaičiuojant nuosėdų sluoksnio storis būna duotas arba pasirenkamas. Tada pagal (10.98) lygtį apskaičiuojama filtravimo trukmė τ.

Plovimo trukmei nustatyti galima panaudoti (10.73) lygtį. Tam tikslui ji perrašoma taip:

$$\tau_{pr} = V_{pr} \cdot \mu_{pr} \cdot \left(r_0 \cdot h_n + R_p\right)/\left(\Delta p \cdot S\right); \qquad (10.99)$$

čia V_{pr} – plovimo vandens debitas; μ_{pr} – plovimo vandens klampa; Δp – slėgių skirtumas, kuriam esant plaunama.

Skaičiuojant pagal (10.99) lygtį, būtina žinoti plovimo skysčio tūrį. Jį galima nustatyti iš lygties

$$V_{pr} = \varepsilon_{pr} \cdot V_n = \varepsilon_{pr} \cdot h_n \cdot S; \qquad (10.100)$$

čia ε_{pr} – savitasis plovimo skysčio tūris (m^3/m^3 nuosėdų), užtikrinantis reikalingą plovimo kokybę, nustatomas eksperimentiškai.

Pagal eksperimentinius duomenis nustatoma kitų pagalbinių operacijų (nuosėdų džiovinimo, nuosėdų iškrovimo ir filtro pripildymo) trukmė $\tau_{p.o}$. Bendra filtro darbo trukmė apskaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$\tau_b = \tau + \tau_{pr} + \tau_{p.o}. \qquad (10.101)$$

Per šį laiką bus gautas toks filtrato kiekis:

$$V = S \cdot h_n/x_0. \qquad (10.102)$$

Vidutinis filtro našumas V_{vid} apskaičiuojamas taip:

$$V_{vid} = V/\tau_b. \qquad (10.103)$$

Pasirinkus filtro paros našumą V_a, reikalingas filtrų skaičius nustatomas tokia tvarka. Pagal literatūrinius duomenis parenkamas vienos filtro sekcijos filtravimo paviršius S ir leistinas nuosėdų sluoksnio storis h_n. Apskaičiuojamos τ_b ir V vertės. Filtravimo ciklų skaičius a, kuris reikalingas, kad būtų pasiektas pasirinktas našumas V_a, apskaičiuojamas taip:

$$a = V_a / V \,. \tag{10.104}$$

Apskaičiuojamas filtravimo ciklų skaičius b, kurį galima atlikti per paros darbo (įrenginio darbo trukmė per parą) trukmę τ_p:

$$b = \tau_p / \tau_b \tag{10.105}$$

Filtrų skaičius

$$N = a/b \,. \tag{10.106}$$

10. 3 .2. Filtruojamosios centrifugos

Jomis dažniausiai atskiriamos vidutinių ir stambių dalelių suspensijos. Šiose centrifugose nuosėdas galima plauti, be to, nuosėdų drėgnumas būna daug mažesnis negu nusodinamosiose centrifugose. Filtruojamosios centrifugos skirstomos į periodines ir nuolatines. Pagal nuosėdų iškrovimo būdą periodinės centrifugos skirstomos į rankinio, gravitacinio ir grandiklinio iškrovimo, o nuolatinės centrifugos – į pulsacinio ir inercinio iškrovimo centrifugas.

Visų filtravimo centrifugų būgno sienelės yra perforuotos (akytos) ir iš vidaus išklotos filtravimo audiniu; dažnai tarp būgno vidinio paviršiaus ir filtravimo audinio įdedamas drenavimo tinklelis. Filtruojamųjų centrifugų darbą galima suskirstyti į tris stadijas: 1) nuosėdų susidarymo – filtracijos; 2) nuosėdų tankinimo ir 3) mechaninio nuosėdų džiovinimo. Pirmajai stadijai tinka filtravimo kinetikos dėsningumai. Antrosios ir trečiosios stadijų trukmei apskaičiuoti patikimų analitinių lygčių nėra.

Panagrinėkime, kokiu slėgiu p išcentrinė jėga veikia centrifugos būgno sienelę (10.35 pav.). Paprasto žiedo formos suspensijos masę $dm = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot H \cdot \rho$ veikia išcentrinė jėga:

$$dG_{išc} = dm \cdot w_r^2 \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H \cdot \omega^2 \cdot \rho_{miš} \cdot dr \,; \tag{10.107}$$

čia ω – kampinis greitis; $\rho_{miš}$ – suspensijos tankis.

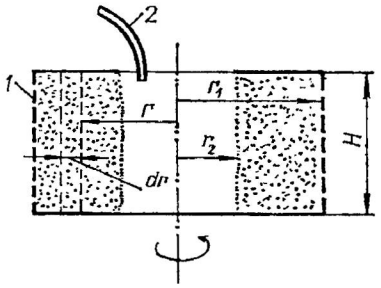
Tuomet paprasto suspensijos žiedo slėgis

$$dp = \frac{dG_{išc}}{F} = \rho_{miš} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot dr \,; \tag{10.108}$$

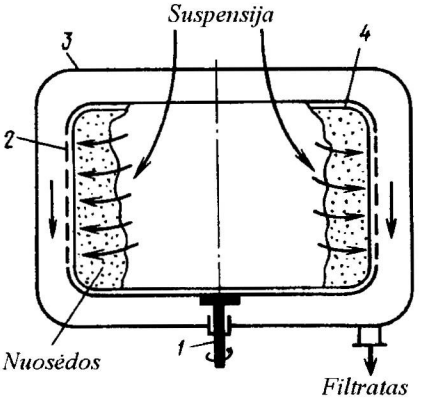
čia F – cilindro, kurį slegia žiedo formos suspensija, plotas.

Visos suspensijos slėgį Δp į būgno sienelę (dėl išcentrinės jėgos) gaunamе suintegravę (10.108) lygtį (integravimo ribos $r_2 - r_1$):

$$\Delta p = \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2} \cdot (r_1^2 - r_2^2) \,. \tag{10.109}$$



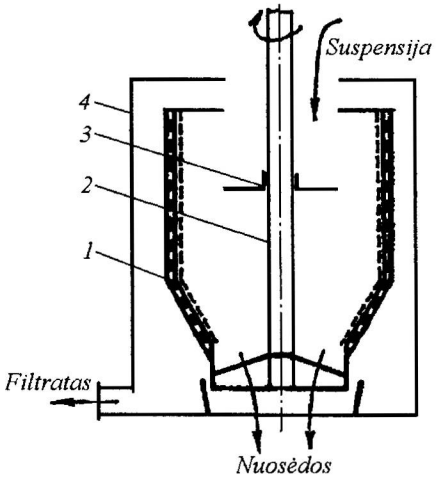
10.35 pav. Rankinio iškrovimo filtruojamosios centrifugos veikimo principas:
1 – perforuota būgno sienelė,
2 – suspensijos tiekimo vamzdis



10.36 pav. Periodinė filtruojamoji centrifuga:
1 – vertikalusis velenas, *2* – perforuotasis būgnas, *3* – korpusas, *4* – filtravimo audinys

Pramoninių filtruojamųjų centrifugų būgno sienelę veikia iki 1,5 MPa slėgis.

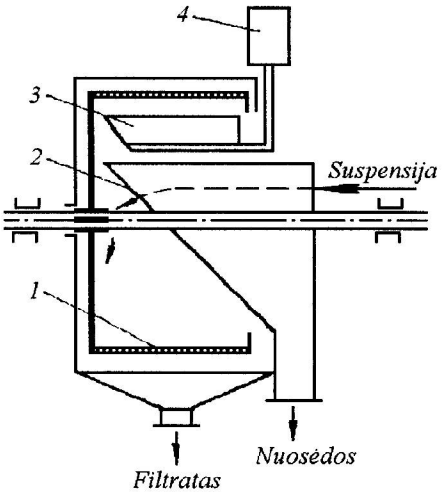
Gravitacinio iškrovimo filtruojamoji centrifuga parodyta 10.37 paveiksle.



10.37 pav. Gravitacinio iškrovimo filtruojamoji centrifuga:
1 – perforuota būgno sienelė, išklota filtravimo audiniu, *2* – velenas, *3* – suspensijos skirstymo diskas, *4* – apsauginis gaubtas

Centrifugos būgno *1* apatinė dalis dažnai būna kūgio formos. Lėtai sukantis būgnui, suspensija tiekiama ant skirstymo disko *3*, pritvirtinto prie būgno veleno *2*. Ant sienelių susikaupus pakankamam nuosėdų kiekiui, būgnas sustabdomas ir nuosėdos iškrinta pro apačioje esančią angą.

Grandiklinio iškrovimo centrifuga (10.38 pav.) yra periodinė. Visos centrifugavimo operacijos (suspensijos tiekimas, centrifugavimas, nuosėdų plovimas ir pašalinimas) atliekamos automatiškai, nestabdant būgno.

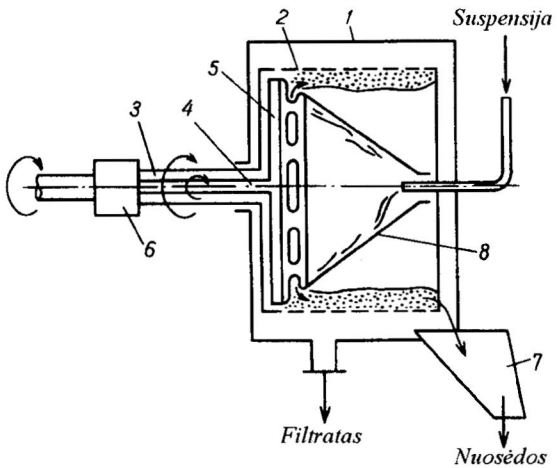


10.38 pav. Grandiklinio iškrovimo centrifuga: *1* – būgnas, *2* – nuosėdų šalinimo latakas, *3* – grandiklis, *4* – grandiklio kilnojimo mechanizmas

Suspensija periodiškai leidžiama į būgną *1*. Susidaręs gana storas nuosėdų sluoksnis plaunamas ir mechaniškai džiovinamas. Paskutinė operacija – nuosėdų pašalinimas. Automatiškai įsijungus hidrauliniam mechanizmui *4*, grandiklis *3* pakyla, nuskuta nuo besisukančio būgno sienelės nuosėdas ir šios išbyra lataku *2*. Nuleidus grandiklį žemyn, centrifugavimo ciklas kartojasi.

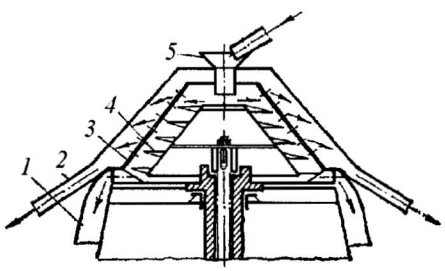
Pulsacinio iškrovimo filtruojamoji centrifuga (10.39 pav.) yra nuolatinė. Suspensija tiekiama į kūginį skirstytuvą *8*, kurio sukimosi dažnis toks pat, kaip ir perforuotojo būgno *2*. Suspensija įgauna sukamąjį judesį ir pro skirstytuvo angas tiekiama ant filtracinės pertvaros prieš stūmoklį *5*. Veikiama išcentrinės jėgos skystoji fazė (filtratas) išteka pro filtracinę pertvarą ir būgno skylutes į korpusą *1* ir pašalinama pro antgalį apatinėje korpuso dalyje. Kietoji fazė sulaikoma ant filtracinės pertvaros ir susidaro nuosėdos. Stūmokliui judant dešinėn, jos periodiškai tam tikru atstumu perstumiamos būgno krašto link. Taigi kiekviena stūmoklio eiga į gaubtą išstumiama dalis nuosėdų, kurios vėliau lataku pašalinamos iš centrifugos. Stūmoklis pritvirtintas prie veleno *4*,

esančio tuščiavidurio veleno *3* viduje, ir sujungtas su mazgu *6*, kuris velenui *4* suteikia sukamąjį ir slankiojamąjį judesį. Būgnas sukamas tuščiavidurio veleno *3*. Būgno ir stūmoklio sukimosi dažnis vienodas. Pulsavimo dažnis – 10...16 postūmių per minutę.



10.39 pav. Pulsacinio iškrovimo nuolatinė filtruojamoji centrifuga:
1 – apsauginis gaubtas, *2* – perforuotasis būgnas su filtracine pertvara, *3* – tuščiaviduris velenas, *4* – velenas, *5* – stūmoklinis stumtuvas, *6* – stūmokliniam stumtuvui judesį suteikiantis mazgas, *7* – latakas, *8* – kūginis skirstytuvas

Ši centrifuga našesnė už periodinę centrifugą, nereikia rankų darbo. Tačiau stūmoklio darbui reikia papildomų energijos sąnaudų. Be to, pašalinus nuosėdas pablogėja filtravimo kokybė, nes filtruojama tik per filtracinę pertvarą (be nuosėdų sluoksnio).



10.40 pav. Inercinio iškrovimo filtruojamoji centrifuga:
1 – nuosėdų šalinimo anga, *2* – nuskaidrinto skysčio ištekėjimo vamzdis, *3* – kūginis būgnas, *4* – kūginis sraigtas, *5* – suspensijos tiekimo atvamzdis

Inercinio iškrovimo filtruojamosios centrifugos schema parodyta 10.40 paveiksle. Suspensija pro atvamzdį *5* patenka į perforuotąjį kūginį būgną *3*, kuriame mažesniu greičiu sukasi kūginis sraigtas *4*. Skystoji fazė, pratekėjusi pro kūginio būgno skylutes, išteka pro vamzdį *2*. Nuosėdos būgno kūgine sienele slenka žemyn ir iškrinta pro angą *1*. Kad nuosėdos ilgiau būtų veikiamos išcentrinių jėgų, jų slinkimą lėtina kūginis sraigtas *4*.

Nuolatinės filtruojamosios centrifugos, kai nurodytas jų našumas pagal suspensiją, skaičiuojamos taip: apskaičiuojamas filtravimo paviršius, pagal filtravimo paviršių parenkama serijinės gamybos centrifuga ir patikrinamas jos našumas pagal nuosėdas. Pramoninei centrifugai skaičiuoti reikalingi duomenys gali būti nustatyti eksperimentiškai, palaikant tą patį filtravimo režimą.

Apytiksliai galima skaičiuoti pagal (10.72) filtravimo lygtį, esant pastoviam slėgių skirtumui abipus filtracinės pertvaros ir filtravimo greičiui, darant prielaidą, kad nuosėdų sluoksnio storis yra pastovus. Slėgių skirtumas Δp gali būti apskaičiuotas pagal (10.109) lygtį. Nuosėdų sluoksnio storis h_n apskaičiuojamas pagal lygtį

$$h_n = (R_2 \cdot R_1)/b \,. \qquad (10.110)$$

Koeficiento b vertė priklauso nuo centrifugos tipo. Filtravimo konstantos nustatomos eksperimentiškai, esant tai pačiai Δp vertei.

10.4. Šlapiasis dujų valymas

Šlapiasis dujų valymas naudojamas dulkėms ir rūkui perskirti. Dulkių dalelės, susilietusios su skysčio paviršiumi, yra sulaikomos jo įtempimo jėgų. Šiuo reiškiniu ir pagrįstas šlapiasis dujų valymas. Taip gali būti valomos dujos, kurios nereaguoja su skysčiu ir į kurias patekę garai nekenkia tolesniam technologiniam procesui. Kaip plovimo skystis naudojamas vanduo, rečiau sodos, sieros rūgšties arba kitų medžiagų vandeniniai tirpalai.

Fazių kontakto paviršius tarp dujų ir skysčio gali būti prilygintas besileidžiančios plėvelės (įkrautiniuose ir išcentriniuose skruberiuose), lašelių (tuščiaviduriuose ir Venturio skruberiuose), dujų burbuliukų (barbotažiniuose skruberiuose) paviršiui.

Dispersinės dalelės su skysčio paviršiumi susiliečia veikiamos jas nešančios jėgos. Tai gali būti sunkio inercijos, molekulių smūgių (Brauno judėjimas) ir turbulentinės pulsacijos jėgos. Šlapiuoju būdu galima efektyviai pašalinti kietąsias daleles, ne mažesnes kaip 3...5 μm (išskyrus Venturio skruberyje vykstančius procesus). Mažesnės dalelės blogai sugaudomos dėl dviejų priežasčių. Pirma, smulkiosios dalelės, judėdamos dujų sraute, aplenkia drėgną paviršių su juo nesusiliesdamos. Antra, arti įkrovos ir aparato sienelių drėgno paviršiaus yra dujų pasienio sluoksnis, kurį smulkiosios dalelės ne

visada įveikia. Venturio skruberiuose dujos juda didesniu greičiu nei kituose aparatuose, todėl inercijos jėgos, atsiradusios suirus sūkuriams, leidžia dalelėms įveikti pasienio sluoksnį. Todėl tokiais aparatais galima sugaudyti 1...2 μm dydžio kietų medžiagų daleles ir iki 0,2 μm skysčio lašelius rūke.

Kad būtų galima efektyviai pašalinti hidrofobines daleles, joms reikia suteikti papildomos kinetinės energijos paviršiaus įtempimo jėgoms nugalėti.

Tais atvejais, kai reikėdavo pašalinti hidrofobines daleles, jų drėkinimui pagerinti į skystį buvo dedama paviršių aktyvinančių medžiagų. Tačiau šlapiajam dujų valymui naudojamas vanduo papildomai užteršiamas organinėmis medžiagomis, o tai neatitinka šiuolaikinių ekologijos reikalavimų.

Šlapiasis būdas taikomas tada, kai valomos dujos gali būti drėkinamos ir aušinamos, o atskiriamos dispersinės dalelės yra menkavertės. Jis tinka ir gana vertingoms dalelėms išskirti iš dujų. Dujas ataušinus iki temperatūros, žemesnės už jose esančių garų kondensacijos temperatūrą, garai kondensuojasi kietos medžiagos dalelių paviršiuje ir padidina masę, todėl dalelės atskiriamos greičiau. Be to, skysčio garai kondensuojasi ir lašelių paviršiuje. Vykstant šiam procesui, likusios garų molekulės judėdamos greitina dulkių judėjimą lašelių link.

Šlapiai valant dujas, susidaro nusodintų dispersinių dalelių turintys nutekamieji vandenys. Jeigu jie gali užteršti aplinką, būtina atskirti juos nusodintuvuose, hidrociklonuose arba centrifugose. Nuskaidrintas skystis gali būti pakartotinai panaudotas dujoms valyti. Šitaip neteršiama aplinka, o kartu taupomas skystis, nes jis papildomas tik tuo kiekiu, kuris prarandamas su sutirštinta suspensija. Nuskaidrintą vandenį pakartotinai tikslinga naudoti ir tais atvejais, kai nutekamieji vandenys neteršia aplinkos.

Šlapiajam dujų valymui yra sukurti įvairių konstrukcijų skruberiai ir putų aparatai.

Tuščiaviduris skruberis. Paprasčiausias skruberis yra tuščiaviduris cilindrinis rezervuaras, į kurį iš apačios tiekiamos dulkės, o iš viršaus purškiamas vanduo. Užterštos dujos gali būti tiekiamos ir iš viršaus. Tada dujos gaunamos sausesnės ir gali būti papildomai valomos sausuose elektriniuose arba rankoviniuose filtruose. Šiuo atveju dujos tolygiau paskirstomos kolonos skerspjūvyje ir intensyviau aušinamos. Skystis kartu su nusodintomis dalelėmis išteka per skruberio kūginio dugno apatinę dalį.

Jeigu tuščiaviduriame skruberyje dulkėtos dujos yra aušinamos ir valomos, tai skysčio sąnaudos būna nuo 3 iki 10 m^3 tūkstančiui kubinių metrų dujų, o jei dujos tik aušinamos, tos sąnaudos sumažėja iki 0,3...0,5 m^3 vandens tūkstančiui kubinių metrų dujų.

Vandens lašeliai, susidūrę su kietos medžiagos dalelėmis, jas nusodina ir išteka suspensijos pavidalu. Išvalytos dujos išteka per viršutinę skruberio dalį. Panašiu principu veikia ir įkrautiniai skruberiai. Įkrovos paskirtis – didinti fazių sąlyčio paviršių. Dažniausiai naudojama žiedinė įkrova. Išvalymo laips-

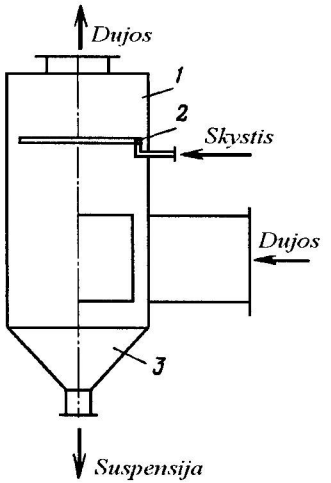
nis – 75...85 %. Jis tuo didesnis, kuo daugiau skysčio sunaudojama laistymui ir kuo didesnis dujų dulkėtumas bei didesnės dalelės. Hidraulinis tuščiavidurio skruberio pasipriešinimas yra mažas – 100...250 Pa.

Įkrautiniai skruberiai. Tokių aparatų kolonos skerspjūvis užpildomas įkrova (smulkiau apie įkrautinius aparatus rašoma absorbcijos dalyje), ir ja plėvele teka skystis. Jam priešinga kryptimi teka dujų srautas, tiekiamas į kolonos apačią. Sudrėkintas įkrovos paviršius tampa fazių sąlyčio paviršiumi.

Jei įkrova nepakankamai drėkinama, prie jos elementų gali prilipti dulkių dalelės, dėl to padidėja aparato hidraulinis pasipriešinimas ir sumažėja jo našumas. Prikibusių dalelių valymas nuo įkrovos yra imlus procesas, susijęs su įkrovos pašalinimu iš aparato. Todėl dulkėtoms dujoms valyti naudojama tik tvarkingai sukrauta apvalių elementų arba styginė įkrova (absorbcijos dalyje), kadangi jai drėkinti reikia mažiau vandens ir kartu sumažėja tikimybė, kad dalelės prikibs prie įkrovos elementų.

Vandens sąnaudos įkrautiniuose skruberiuose siekia 1,5...6 m^3 tūkstančiui kubinių metrų dujų. Hidraulinis pasipriešinimas – 200...300 Pa.

Išvalymo laipsnis priklauso nuo tų pačių veiksnių, kaip ir tuščiaviduriuose skruberiuose: 2...5 μm dalelių sugaudoma iki 70 %, didesnių – 80...90 %. Mažesnės kaip 1 μm dalelės sugaudomos blogai.



10.41 pav. Išcentrinis skruberis:
1 – korpusas, *2* – žiedinis laistomasis vamzdis, *3* – kūginis dugnas

Išcentriniai skruberiai. Tokiuose skruberiuose šlapiojo dujų valymo procesas intensyvesnis negu įkrautiniuose, nes jis vyksta papildomai veikiant ir išcentrinėms jėgoms. Išcentrinio skruberio schema pavaizduota 10.41 paveiks-

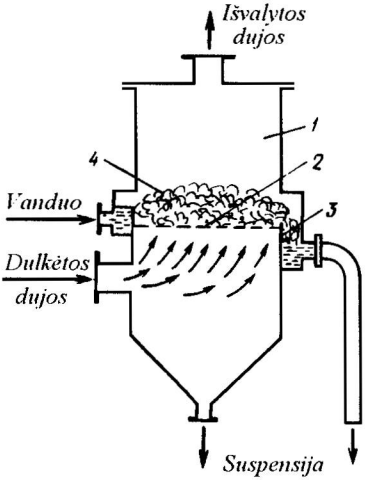
le. Dulkėtų dujų srautas apie 20 m/s greičiu liestinės kryptimi pro stačiakampio skerspjūvio atvamzdį patenka į cilindrinę skruberio dalį 1 ir įgauna sukamąjį judesį.

Vidinis korpuso paviršius nuolat laistomas vandeniu. Iš tūtos ištekėjusi vandens čiurkšlė juda valomų dujų srauto ir korpuso vidinio paviršiaus link ir šitaip ne tik drėkina korpuso paviršių, bet ir sudaro tarsi vandens užtvarą centrine skruberio dalimi judančiam dujų srautui. Toliau skystis plona plėvele teka korpuso paviršiumi.

Sraigtine linija kylančiame dujų sraute pakibusios kietos medžiagos dalelės, veikiamos išcentrinių jėgų, spaudžiamos prie korpuso sienelių, sudrėkinamos skysčio plėvelės ir pašalinamos. Prie dujų tiekimo atvamzdžio plėvelė suyra ir sudaro rūką, ant kurio lašelių paviršiaus taip pat nusėda dalis kietos medžiagos dalelių. Skystis su surinktomis kietos medžiagos dalelėmis (suspensija) išteka iš aparato pro kūginį dugną *3*. Išvalytos dujos pasišalina pro dujų išleidimo atvamzdį.

Skysčio sąnaudos išcentriniuose skruberiuose – 0,1...0,2 m^3 tūkstančiui kubinių metrų valomų dujų. Hidraulinis pasipriešinimas priklauso nuo dujų greičio tiekimo atvamzdyje ir skruberio skersmens. Įtekant dulkėtoms dujoms 20 m/s greičiu, hidraulinis pasipriešinimas būna 500...800 Pa.

Dujų išvalymo laipsnis tokiomis pačiomis sąlygomis išcentriniuose skruberiuose pasiekiamas didesnis negu įkrautiniuose skruberiuose: pvz., 2...5 μm dydžio dalelių sugaunama apie 90 %, o 15...20 μm dalelių – daugiau kaip 95 %.



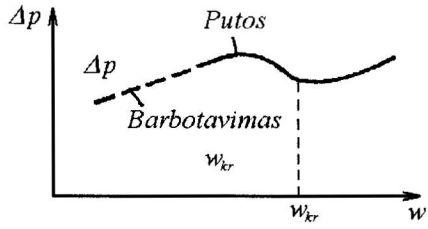
10.42 pav. Barbotažinis dulkių gaudiklis: *1* – korpusas, *2* – perforuota lėkštė, *3* – persiliejimo slenkstis, *4* – putų sluoksnis virš lėkštės

Barbotažiniai dulkių gaudytuvai arba putų aparatai. Jais valomos labai užterštos dujos. Tokiuose aparatuose su dujomis sąveikaujantis skystis paverčiamas judriomis putomis, todėl susidaro didelis fazių kontakto paviršius.

Barbotažinį dulkių gaudytuvą (10.42 pav.) sudaro cilindras arba stačiakampis korpusas *1*, kuriame yra perforuota (skylėta) lėkštė *2*. Cilindriniuose aparatuose tolygiau pasiskirsto tiekiamų dujų srautas, o stačiakampiuose – ant skylėtos pertvaros geriau pasiskirsto skystis ir todėl susidaro vienodesnis putų sluoksnis. Vanduo arba kitas plovimo skystis pro atvamzdį tiekiamas ant lėkštės. Į apatinę aparato dalį pro atvamzdį žemiau lėkštės tiekiamos dulkėtos dujos. Pro lėkštės skylutes tekėdamos dulkės barbotuoja per skystį ir paverčia jį judančiu putų sluoksniu *4*. Putų sluoksnio aukštis reguliuojamas slenksčiais *3*. Putų sluoksnyje kietosios dalelės sulaikomos skysčiu. Dalis skysčio pasišalina iš aparato persiliedamas per persiliejimo slenkstį, kita dalis išteka pro lėkštės angas. Pratekėjęs pro angas skystis jas nuplauna ir po lėkšte esančioje ertmėje sugaudo stambias kietąsias dulkių daleles. Gauta suspensija išleidžiama iš aparato apatinės dalies. Kai dujose yra daug dulkių ir dujų išvalymui keliami dideli reikalavimai, naudojami aparatai su dviem, trimis arba daugiau viena virš kitos išdėstytų lėkščių. Kadangi dujų ir skysčio srautai nuosekliai prateka per visas lėkštes, tai tokiais aparatais pasiekiamas didesnis išvalymo laipsnis.

Skysčio sąnaudos barbotažiniuose dulkių gaudytuvuose – 0,2...0,3 m^3 tūkstančiui kubinių metrų dujų. Vienos lėkštės aparatų hidraulinis pasipriešinimas 500...1000 Pa. 20...30 μm dydžio ir stambesnės dulkių dalelės barbotažiniuose aparatuose sugaudomos visos, 5 μm dydžio dalelių sugaudoma 80...90 %. Mažesnio dydžio dalelės sugaudamos gerokai blogiau, ypač jeigu jos yra hidrofobinės. Dirbant barbotažiniam aparatui, dujų srauto debitas neturi labai svyruoti, kadangi tai gali sutrikdyti putų režimą ir užkimšti lėkštės skylutes.

Dujoms judant per vandens sluoksnį, hidraulinis jo pasipriešinimas kinta netolygiai (10.43 pav.).

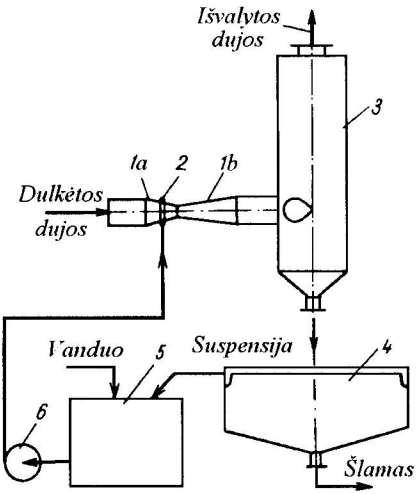


10.43 pav. Slėgio nuostolių putų sluoksnyje priklausomybė nuo srauto greičio

Nedideliu greičiu į barbotažinį gaudytuvą per ant skylėtos pertvaros esantį vandens sluoksnį tiekiamos dujos sudaro burbuliukus. Toks procesas

vadinamas barbotavimu. Šiuo atveju hidraulinis pasipriešinimas tiesiai proporcingas dujų greičiui. Tačiau toliau didinant dujų greitį, pasikeičia putų sandara, susidaro vis didesni dujų burbulai ir mažėja putų sluoksnio vidutinis tankis. Todėl, didėjant dujų greičiui, pradeda mažėti hidraulinis pasipriešinimas. Kai greitis tampa didesnis už kritinį, putų sluoksnis suyra ir dujų sraute lieka skysčio lašelių. Esant tokiam judėjimui, slėgio nuostoliai proporcingi dujų greičiui.

Barbotažiniuose dulkių gaudytuvuose reikia parinkti optimalų dujų greitį, nes kuo didesni dujų burbulai, tuo mažesnis dujų ir skysčio lietimosi paviršius ir tuo blogiau nuo dujų atskiriamos kietos medžiagos dalelės. Geriausiai dujos išvalomos, kai laisvame aparato skerspjūvyje dujos tiekiamos 2...3 m/s greičiu, o putų sluoksnio aukštis 0,15...0,2 m. Barbotažiniais gaudytuvais valomos iki 0,3 kg/m^3 užterštos dujos. Perskyrimo laipsnis siekia 99 %.



10.44 pav. Dujų valymo Venturio skruberiu schema:
1 – Venturio vamzdelis (*1a* – konfuzorius, *1b* – difuzorius), *2* – vandens tiekimo skirstytuvas, *3* – cikloninis separatorius, *4* – suspensijos nusodintuvas, *5* – tarpinė talpykla, *6* – siurblys

Venturio skruberiai. Šiais aparatais iš dujų valomos smulkios kietos medžiagos dalelės. 10.44 pav. pavaizduota dujų valymo schema, kurioje dujos valomos Venturio skruberiu. Dulkės tiekiamos per konfuzorių *1a* į Venturio vamzdžio difuzorių *1b*. Pro konfuzoriaus *1a* sienelėje esančias angas specialiu purkštuku *2* išpurškiamas vanduo. Venturio vamzdžio siauriausioje vietoje pasiekiamas labai didelis dujų srauto greitis (iki 100 m/s). Išpurkštas vanduo, susidūręs su dujų srautu, išsitaško mažais lašeliais. Didelis dujų srauto turbu-

lentiškumo laipsnis padeda dulkių dalelėms su lašeliais koaguliuoti. Palyginti dideli skysčio lašai kartu su surinktomis kietos medžiagos dalelėmis prateka pro Venturio vamzdžio difuzorių, kuriame jų greitis sumažėja iki 20...25 m/s ir patenka į ciklonį separatorių *3*. Čia lašeliai, veikiami išcentrinės jėgos, atsiskiria nuo dujų ir suspensijos pavidalu pasišalina iš apatinės kūginės ciklono dalies.

Naudojant 10.44 pav. pavaizduota schemą, šlapiojo dujų valymo metu galima taupyti vandenį. Suspensija iš cikloninio separatoriaus patenka į nusodintuvą *4*. Sutirštinta suspensija (šlamas) išleidžiama pro kūginį nusodintuvo dugną, o nuskaidrintas vanduo iš viršutinės nusodintuvo dalies nuteka į tarpinį indą *5*, į kurį po truputį tiekiamas šviežias vanduo nuostoliams kompensuoti. Toliau vanduo iš indo *5* siurbliu *6* tiekiamas į Venturio vamzdelio skirstomąjį mechanizmą.

Tam, kad Venturio vamzdis dirbtų efektyviai, pradžioje dujas reikia ataušinti ir prisotinti vandens garų. Priešingu atveju Venturio vamzdyje išgaruos patys smulkiausi skysčio lašeliai, kurie aktyviausiai sąveikauja su dulkių dalelėmis.

Vandens sąnaudos Venturio skruberyje palyginti didelės – 0,7...3 m^3 tūkstančiui kubinių metrų dujų. Hidraulinis pasipriešinimas sąlygiškai didesnis negu kitų šlapiojo dujų valymo aparatų ir siekia 3000...7000 Pa. Tačiau šiuose skruberiuose efektyviai sugaudomos labai smulkios dalelės: net 95...99 % 1...2 μm dydžio kietųjų dalelių ir 0,2...1 μm dydžio rūko lašelių.

Šlapiojo dujų valymo aparatų skaičiavimas. Kai kuriais atvejais pakibusių kietųjų dalelių išvalymo iš dujų laipsnis apskaičiuojamas pagal empirines formules. Paprastai jis nustatomas eksperimentiškai. Jeigu išvalymo laipsnis yra žinomas, tai pagal šlapiojo dujų valymo balanso (10.111) ir (10.112) lygtis galima apskaičiuoti kietųjų dalelių koncentraciją išvalytose dujose ir sugaudytų dalelių kiekį:

$$C_g = C_p \cdot (1 - \eta), \qquad (10.111)$$

$$G_d = V_p \cdot C_p - V_g \cdot C_g; \qquad (10.112)$$

čia C_g ir C_p – kietųjų dalelių koncentracija išvalytose ir į aparatą tiekiamose dujose, kg/m^3; G_d – sugaudomų dalelių kiekis (debitas), kg/s; V_p ir V_g – valyti tiekiamų ir išvalytų dujų tūrio debitas, m^3/s.

Žinant G_d ir kietųjų dalelių koncentraciją skystyje, pagal empirinius santykius apskaičiuojamos vandens sąnaudos. Tam įtakos turi ir aparato tipas bei darbo sąlygos.

10.5. Aparato parinkimas nevienalytėms sistemoms perskirti

Parenkant aparatus reikia atsižvelgti į reikalavimus perskyrimo kokybei: į aplinką galima šalinti tik švarų orą ar vandenį. Siurblių ir ventiliatorių rotorius reikia apsaugoti, kad greitai nesusidėvėtų dėl kietųjų dalelių keliamos erozijos, ir iš dujų arba skysčių sugaudyti vertingas pakibusias daleles. Taip pat būtina atsižvelgti į dispersinių dalelių koncentraciją, jų pasiskirstymą pagal dydį, terpės agresyvumą, jos temperatūrą ir kt. bei aparato darbo techninius ekonominius rodiklius.

10.3 lentelė. Vidutinės pagrindinių dujų valymo aparatų charakteristikos

Aparatai	Maksimalus kietųjų dalelių kiekis, kg/m^3	Mažiausių dalelių dydis, μm	Išvalymo laipsnis, %	Hidraulinis pasipriešinimas, Pa
Dulkių kameros	nelimituojama	100	30...40	50
Ciklonai	0,4	10	70...99	400...700
Ciklonų baterijos	0,1	10	85...95	500...800
Elektriniai filtrai	0,01...0,05	0,005	95...99	100...200
Rankoviniai filtrai	0,02	1	98...99	500...2500
Išcentriniai skruberiai	0,05	2	90...95	400...800
Putų aparatai	0,3	5	80...99	500...1000
Venturio skruberiai	0,05	1	95...99	3000...7000

Analizuojant dujų valymo aparatų darbą, matyti, kad perskyrimo efektyvumui didėjant didėja energijos sąnaudos ir aparatų dydis. Elektriniuose filtruose ir rankoviniuose filtruose dujos valomos efektyviau, esant nedideliems jų srauto greičiams, t. y. naudojant didesnių matmenų aparatus. Ciklonuose ir Venturio skruberiuose, kur kietosios dalelės atskiriamos išcentrine jėga, didesnis dujų išvalymo laipsnis pasiekiamas tuo atveju, kai didesnis srauto greitis, o srauto greičiui didėjant didėja hidraulinis pasipriešinimas ir energijos sąnaudos dujoms transportuoti.

Dulkių kamerų ir ciklonų gamyba ir eksploatavimas yra pigiausi, bet juose atskiriamos tik stambiosios dalelės. Todėl vieni jie naudojami, kai reikia valyti stambiomis dalelėmis užterštus nedidelius dujų kiekius. Dažniausiai šie aparatai naudojami į rankovinius bei elektrinius filtrus tiekiamų dujų arba per ventiliatorius judančių dujų pirminiam valymui, kad mažiau diltų ventiliatoriaus mentės.

Elektriniais filtrais pasiekiamas didelis net ir labai smulkių dalelių išvalymo laipsnis, tačiau dažnai reikia specialiai paruošti dujas (sumažinti kietųjų dalelių koncentraciją). Jie netinka mažos elektrinės varžos dalelėms atskirti.

Rankoviniuose filtruose dideliu laipsniu išvalomos dalelės, didesnės kaip 1 μm, tačiau jie gali dirbti tik esant nedideliam valomų dujų dulkėtumui, nu-

rodytame temperatūrų intervale. Rankovinių filtrų gamybos išlaidos mažesnės negu elektrinių filtrų, o eksploatacija brangesnė.

Šlapiojo valymo aparatai iš dujų efektyviai išvalo vidutinio dispersiškumo daleles. Jie naudotini, kai dujas reikia sudrėkinti ir atvėsinti. Šių aparatų gamyba paprasta, eksploatacija nebrangi. Tačiau sunaudojama daug vandens, aparatus reikia apsaugoti nuo korozijos. Jeigu susidariusi suspensija kelia pavojų aplinkai, būtini papildomi aparatai šioms dalelėms išskirti iš skysčių.

Paprasčiausi suspensijų perskyrimo aparatai yra nusodintuvai, nes mažos jų gamybos išlaidos ir pigi eksploatacija. Tačiau dėl mažos proceso varos jėgos jie būna labai dideli ir blogai atskiria mažas daleles. Nusodintuvai naudotini pradiniam didelės kietųjų dalelių koncentracijos suspensijų perskyrimui arba suspensijai skaidyti į frakcijas pagal kietos medžiagos dalelių dydį.

Našesni yra hidrociklonai ir centrifugos. Jais galima atskirti mažesnes dispersines daleles. Tačiau šie aparatai (ypač centrifugos) gerokai brangesni, jų eksploatacinės išlaidos taip pat didesnės. Jie netinka abrazyvinėms dalelėms atskirti.

Efektyviausiai suspensijos perskiriamos filtrais arba filtruojamosiomis centrifugomis. Jais galima iš suspensijų išskirtas kietąsias daleles plauti, prapūsti ir padžiovinti. Tačiau šių aparatų eksploatacija brangi ir sudėtinga.

10.6. Nevienalyčių sistemų perskyrimo procesų paspartinimo ir efektyvumo padidinimo metodai

Jeigu dispersinės dalelės iš dispersijos terpės išskiriamos labai lėtai ir reikalingas tik pradinis nevienalytės sistemos perskyrimas, gali būti taikomi tokie metodai kaip koaguliacija (lot. *coagulatio* – suvyniojimas, surišimas), flokuliacija (lot. *flocculi* – dribsniai) ir deflokuliacija, flotacija (angl. *floatation* – išplaukimas) ir klasifikacija.

Koaguliacija skystose nevienalytėse dispersinėse sistemose vyksta, esant dalelių judėjimui, maišant nevienalytes dispersines sistemas į jas pridėjus koaguliaciją skatinančių priedų (koaguliantų). Susidūrusios koloidinės dalelės sulimpa ir dėl kitų priežasčių (vykstant šiluminiam, vadinamajam Brauno, judėjimui).

Koaguliantai suardo solvatuotus pakibusių dalelių apvalkalus ir sumažina dvigubo elektrinio sluoksnio prie pakibusių dalelių difuzinę dalį. Dėl to tarp dalelių atsiranda sukibimo jėgos, kurios paskatina dalelių agregaciją ir kartu paspartina jų nusėdimą. Paprastai koaguliacija sukelia progresuojantį dalelių stambėjimą. Agregatuose pirminės dalelės sujungtos tarpmolekulinės sąveikos jėgomis tiesiogiai arba per daleles supančios dispersinės terpės sluoksnį. Koaguliacija yra savaiminis procesas, kuris, remiantis termodinamikos dėsniais, vyksta dėl to, kad sistema stengiasi pereiti į žemesnį laisvos energijos lygį. Minimali šių medžiagų koncentracija, kuri sukelia koaguliaciją, vadinama

koaguliavimo riba. Kaip koaguliantai paprastai naudojamos polivalentinių metalų (aliuminio, geležies ir kt.), dažniausiai organinių rūgščių, druskos.

Koaguliacijos vaidmuo daugelyje technologinių procesų gana didelis. Šildant biopolimerus, baltymus, nukleinines rūgštis, kintant jų pH, pastebima ir koaguliacija. Koaguliantai plačiai naudojami smulkiai dispersinėms mechaninėms priemaišoms valyti iš gamtinių ir nutekamųjų vandenų, aerozoliams valyti iš oro erdvės, kaučiukui išskirti iš latekso, kai kuriems maisto produktams gauti.

Koaguliacijai atvirkščias procesas yra agregatų suirimas į pirmines daleles, vadinamas peptizacija. Šis procesas vyksta pridedant į dispersinę terpę peptizatorių, t. y. medžiagų, ardančių agregatus į pradines daleles. Peptizatoriais gali būti elektrolitai ir paviršių aktyvinančios medžiagos, pvz., geležies chloridas, humuso rūgštys ir kt.

Chemijos ir maisto pramonėje peptizacija naudojama skystoms dispersinėms sistemoms gauti iš miltelių ir pastų.

Koaguliacijos atmaina yra flokuliacija, kurios metu skystoje arba dujinėje terpėje pakibusios smulkios dalelės sudaro purius dribsnių pavidalo agregatus – flokulus. Kaip flokuliantai dažniausiai naudojami tirpūs polimerai – polielektrolitai. Polimerinių flokuliantų veikimas aiškinamas siūlo formos makromolekulių adsorbcija tuo pačiu metu ant kelių dalelių ir dribsnių pavidalo agregatų susidarymu, kurie gana lengvai gali būti pašalinti nusodinant arba filtruojant. Ruošiant vandenį techninėms ir buitinėms reikmėms, koncentruojant naudingas iškasenas, iš nutekamųjų vandenų išskiriant vertingas medžiagas ir jų kenksmingumą šalinant flokuliantais, plačiai naudojama polisilicio rūgštis, poliakrilamidas ir kt. Valant vandenį naudojama maža polimerinių flokuliantų koncentracija – 0,2...5 mg/l.

Agregatams suardyti į skystas sistemas kai kada įpilama priedų, kurie dalelėms suteikia krūvius, trukdančius dalelėms suartėti. Norimas efektas pasiekiamas ir pakeitus terpės pH. Toks suspensijos pusiausvyros pakeitimas vadinamas deflokuliacija.

Flotacija vadinamas dujų, dažniausiai oro burbuliukų, prilipimas prie blogai vilgomų hidrofobinių dalelių. Susidariusi sistema – putos su dalelėmis – pašalinama nuo skystosios fazės paviršiaus. Flotaciją galima naudoti ne tik dispersinės fazės dalelėms pašalinti, bet ir skirtingai dispersijos terpės vilgomoms dalelėms perskirti. Šiuo atveju hidrofobinės dalelės išskirtinai prilimpa prie fazių paviršius skiriančios ribos, paprastai oro ir vandens, ir atsiskiria nuo hidrofobinių dalelių, kurios nusėda ant aparato dugno. Geriausi rezultatai gaunami, kai dalelių dydis 0,1...0,04 mm.

Žinoma keletas flotacijos būdų: tepalinė, putų, elektrinė flotacija ir kt. Plačiai paplito putų flotacija, kurios metu reagentais apdorotos dalelės oro burbuliukų išnešamos į vandens paviršių ir dėl to susidaro putų sluoksnis, kurio stabilumas reguliuojamas pridedant putokšlių.

Mažų kiekių smulkių dalelių atskyrimą nuo pagrindinio srauto galima suintensyvinti flotuojant kintamo skerspjūvio aparatuose, kuriuose mažėja dispersinės sistemos judėjimo greitis. Tokia klasifikacija efektyviai atliekama hidrociklonuose ir centrifugose, kur veikia išcentrinė perskyrimo jėga.

Perspektyvus suspensijų perskyrimo metodas yra sistemos apdorojimas magnetiniu lauku. Yra žinoma, kad magnetiniu lauku apdorotas vanduo gana ilgai išlaiko iš dalies sumažėjusią vilgymo gebą, kas leidžia suintensyvinti suspensijos perskyrimo procesą.

11 DALIS

MECHANINIAI PROCESAI

Mechaninių procesų – smulkinimo, rūšiavimo, maišymo, presavimo ir granuliavimo metu dažniausiai pasikeičia tik medžiagos dalelių dydis ir forma bei jų pasiskirstymas, o fizikinės cheminės savybės nesikeičia.

11.1. Smulkinimas

Smulkinimas – tai medžiagų suardymas iki reikiamo dydžio dalelių. Dažniausiai veikiant mechaninėms jėgoms smulkinamos kietos medžiagos. Rečiau cheminėje technologijoje zolių arba gelių pavidalo medžiagos smulkinamos cheminiais, šiluminiais, elektriniais, elektrohidrauliniais, lazeriniais metodais arba disperguojant skysčius skysčiuose (ruošiant emulsijas).

Nagrinėsime kietų medžiagų smulkinimą veikiant jas išorinėmis mechaninėmis jėgomis.

Išorinės jėgos P veikiamoje medžiagoje gali susidaryti tokie vidiniai įtempiai: 1) gniuždymo, 2) tempimo, 3) lenkimo, 4) sukimo, 5) kirpimo ir skėlimo. Medžiaga suardoma į dalis, kai normaliniai ($\sigma = (P \cdot \cos\alpha)/F$) arba tangentiniai ($\tau = (P \cdot \sin\alpha)/F$) vidiniai įtempiai viršija jos stiprumo (σ_B) arba trūkimo (σ_{tr}) ribą. Trapiųjų medžiagų stiprumo ir trūkimo ribos sutampa, plastiškųjų – skiriasi.

Kerpant ir pjaustant galima gauti ne tik reikiamo dydžio, bet ir norimos geometrinės formos smulkinamos medžiagos daleles; smulkinant kitais būdais gaunamos neapibrėžtos geometrinės formos dalelės arba gabaliukai.

Pagal medžiagos gabalų arba dalelių dydį prieš smulkinimą ir po jo smulkinimo procesai skirstomi į *trupinimą* ir *malimą* (11.1 lentelė).

Trupinimo tikslas – susmulkinti medžiagą į reikiamo dydžio ir reikiamos granuliometrinės bei frakcinės sudėties gabalus ir (dažniausiai) paruošti medžiagą malti.

Malimo tikslas – gauti miltelių pavidalo reikiamos granuliometrinės sudėties bei pageidaujamos dalelių geometrinės formos (aštriabriaunių, apvalainų, plokštelių pavidalo ir pan.) produktą.

11.1 lentelė. Smulkinimo procesų klasifikacija

Eil. Nr.	Smulkinimo procesai	Didžiausi gabalų ir dalelių matmenys, mm	
		prieš smulkinimą	po smulkinimo
	a) Trupinimas:		
1.	stambusis	1500...200	250...50
2.	vidutinis	250...50	50...10
3.	smulkusis	50...10	10...1,0
	b) Malimas:		
4.	rupusis	5...1,0	0,1...0,04
5.	vidutinis	0,1...0,04	0,05...0,015
6.	smulkusis	0,1...0,04	0,005...0,001
7.	labai smulkus (koloidinis)	0,1...0,04	< 0,0004

Smulkinimas įgalina: 1) pagerinti mišinių vienalytiškumą, 2) paspartinti chemines bei biochemines reakcijas ir padidinti pradinių medžiagų sureagavimo laipsnį (pvz., mineralinių rišamųjų medžiagų, mineralinių trąšų, pigmentų, maisto produktų ir kitų medžiagų gamyboje); 3) padidinti tolesnių technologinių procesų (pvz., maišymo, džiovinimo, degimo ir kt.) intensyvumą; 4) sumažinti technologinių procesų temperatūras arba slėgius (pvz., stiklo lydymo); 5) pagerinti medžiagų ir gaminių fizikines mechanines bei reologines savybes ir mikrostruktūrą (pvz., metalų lydinių, betonų, statybinės ir techninės keramikos, ugniai atsparių medžiagų ir kt.); 6) padidinti dažų ir pigmentų dengiamumą; 7) padidinti katalizatorių aktyvumą; 8) perdirbti gamybos niekalą bei susidėvėjusius gaminius (pvz., plastikus, gumą ir kt.); 9) padidinti heterofazinių reakcijų sąlyčio paviršių ir intensyvumą; 10) padidinti dalelių paviršiaus defektingumą, jų paviršinę laisvąją energiją bei dalelių cheminį aktyvumą; 11) padidinti mišinio komponentų tirpumą bei pakeisti komponentų koncentracijų skystoje fazėje santykį; 12) sumažinti pradinių medžiagų poringumą; 13) palengvinti kenksmingų priemaišų šalinimą iš pradinių medžiagų ir kt.

11.1.1. Pagrindiniai smulkinimo proceso rodikliai

Smulkinamos medžiagos charakteristikos, lemiančios smulkinimo būdą ir reikiamas energijos sąnaudas, yra:

1) *medžiagos dispersiškumo pokytis* smulkinimo metu, kuris įvertinamas medžiagos smulkinimo laipsniu. Skiriamas:

a) linijinis medžiagos smulkinimo laipsnis:

$$i = d_{pr} / d_g ; \qquad (11.1)$$

čia d_{pr} – vidutinis gabalų skersmuo prieš smulkinimą, m; d_g – vidutinis susmulkintų dalelių skersmuo, mm;

b) tūrinis smulkinimo laipsnis:

$$a = V_{pr} / V_g \; ; \qquad (11.2)$$

čia V_{pr} – pradinių gabalų tūris, m^3; V_g – susmulkintų dalelių tūris, m^3.

Jei smulkinami *stambūs* įvairios formos gabalai, tai vidutinis smulkinti tiekiamų gabalų dydis nustatomas tiesiogiai išmatuojant į trupintuvą tiekiamų didžiausių pradinių gabalų ilgį l, plotį b ir aukštį h metrais:

$$d_{pr} = (l + b + h)/3, \qquad (11.3)$$

arba

$$d_{pr} = \sqrt[3]{6 \cdot V / \pi} = 1{,}24 \cdot \sqrt[3]{M / \rho} \; ; \qquad (11.4)$$

čia V – ekvivalentinio rutulio tūris, kuris atitinka didžiausio gabalo tūrį, m^3; M – gabalo masė, kg; ρ – medžiagos tankis, kg/m^3.

Smulkios medžiagos mišinio dalelių vidutinis skersmuo nustatomas persijojus mišinį per standartinių sietų su mažėjančiomis akutėmis rinkinį ir suskirsčius mišinį į atskiras frakcijas. Kiekvienoje frakcijoje nustatomas jos kiekis masės dalimis (a_i) ir vidutinis frakcijos dalelių dydis $d_{i\,vid}$, m:

$$d_{i\,vid.} = (d_1 + d_2)/2 \; ; \qquad (11.5)$$

čia d_1 – viršutinio sieto, per kurį dar perėjo visa frakcija, skylučių skersmuo, m; d_2 – sieto, ant kurio liko frakcija, skylučių skersmuo, m.

Nustatę visų atskirų medžiagos frakcijų vidutinius skersmenis ir jų kiekius masės dalimis a_i, apskaičiuojame viso mišinio dalelių vidutinį skersmenį:

$$d_{m\,vid.} = (d_{1vid} \cdot a_1 + d_{2vid} \cdot a_2 + ... + d_{nvid} \cdot a_n)/(a_1 + a_2 + ... + a_n) \; ; \qquad (11.6)$$

2) savitosios smulkinimo energijos sąnaudos – tai vienam kilogramui medžiagos susmulkinti sunaudotos energijos kiekis (W·s/kg);

3) susmulkinto produkto dalelių granuliometrinė sudėtis (%) ir savitasis paviršius (m^2/kg). Granuliometrinė sudėtis nustatoma sietų analizės, o savitasis paviršius – smulkiadispersių medžiagų sluoksnio dujų pralaidumo (Bleino) arba žemos temperatūros dujų adsorbcijos (BET) metodais. Susmulkintas produktas taip pat gali būti apibūdinamas stambios, vidutinės arba smulkios frakcijos leidžiamo kiekio ribomis.

4) medžiagos stiprumas ir trapumas. Medžiagos stipris gniuždant ir tempiant priklauso ne tik nuo jos cheminės bei mineralinės sudėties, struktūros, struktūrinių dalelių ryšio tipo, bet ir nuo struktūros defektų tipo, jų skaičiaus, mikroplyšelių buvimo joje. Mažėjant smulkinamos medžiagos gabalų dydžiui, mažėja kristalinės struktūros defektų skaičius ir didėja jos stiprumas bei smul-

kinimo savitosios energijos sąnaudos. Pagal stiprį gniuždant medžiagos skirstomos į šias grupes:

a) labai stiprias (σ_{gn} = *250...450* MPa ir daugiau, pvz., tankiųjų bazaltų $\sigma_{gn} > 1000$ MPa);

b) stiprias (σ_{gn} = *50...250* MPa, pvz., granitai);

c) vidutinio stiprumo (σ_{gn}=*10...50* MPa, pvz., dolomitai);

d) minkštas (σ_{gn}<*10* MPa, pvz., diatomitai).

Daugumos medžiagų stipris *gniuždant* σ_{gn} yra daug kartų didesnis už stiprį *tempiant* σ_t. Medžiagos *trapumas* yra apibūdinamas šių stiprių santykiu:

$$R_{tr} = \sigma_{gn} / \sigma_t . \qquad (11.7)$$

Kuo didesnis šis santykis, tuo medžiaga trapesnė. Ypač didelės šio santykio vertės (R_{tr} = *40...60*) yra polimineralinių medžiagų. Tokios polimineralinės medžiagos kaip gamtinės magminės uolienos arba keraminės dirbtinės medžiagos, nors yra *stiprios gniuždant*, tačiau *trapios*.

Medžiagų stiprio gniuždant arba tempiant nustatymo bandymai yra gana sudėtingi, nes reikia pagaminti specialius medžiagos bandinius. Todėl, norint greitai įvertinti visos medžiagos arba jos atskirų dalių mechanines savybes, dažnai atliekami *kietumo* nustatymo bandymai. Daugumos medžiagų paviršinių sluoksnių kietumas tiesiogiai priklauso nuo jų tūrinio stiprio gniuždant ir tempiant, taigi *pagal medžiagos kietumą iš dalies galima spręsti ir apie jos stiprumą.*

5) *kietumas* – tai medžiagos paviršinių sluoksnių savybė priešintis kito, beveik nesideformuojančio kietesnio kūno įsiskverbimui. Kietumas apibūdina medžiagos paviršiaus sluoksnių gebą priešintis tokiems paviršiniams mechaniniams poveikiams, kaip įspaudimas, įbrėžimas, trynimas, šlifavimas, poliravimas. *Paviršiaus sluoksnių kietumas* daug lemia medžiagos atsparumą nusitrynimui, todėl ši savybė labai svarbi *malimo* procesuose.

Medžiagų kietumas nustatomas keliais būdais.

Savitajam, *reliatyviajam,* kietumui H_o nustatyti naudojama F. Moso etaloninių mineralų kietumo skalė arba šios skalės mineralus pakeičiančios paprastos priemonės (11.2 lentelė).

F. Moso kietumo skalėje etaloniniai mineralai parinkti taip, kad kiekvieną jų galima įrėžti tik kitu didesnį kietumo laipsnį turinčiu mineralu. Ši skalė naudojama vienalyčių akmens pavidalo, lygaus paviršiaus medžiagų kietumui apibūdinti ir palyginti.

11.2 lentelė. F. Moso mineralų kietumo skalė

Kietumas H_o pagal Moso skalę	Etaloninis Moso skalės mineralas	Absoliutusis kietumas *HB*, kgf/mm^2	Priemonės, kuriomis galima pakeisti etaloninį mineralą
1	Talkas	2,4	Labai minkštas pieštukas
2	Gipsas	36,0	Nagas
3	Kalcitas	109,0	Varinė moneta
4	Fluoritas	189,0	Geležinė vinis
5	Apatitas	536,0	Stiklas
6	Ortoklazas	795,0	Plieninis peilis
7	Kvarcas	1120,0	Dildė
8	Topazas	1427,0	-
9	Korundas	2060,0	-
10	Deimantas	10060,0	-

Absoliutusis kietumas išreiškiamas kgf/mm^2 ir nustatomas kietmačiais, arba sklerometrais, įspaudus tam tikra jėga standartinės formos ir dydžio antgalį (indentorių) į tiriamosios medžiagos paviršių ir išmatavus susidariusios įspaudos paviršiaus plotą arba gylį. Labiausiai paplitę trys absoliučiojo kietumo nustatymo būdai: *Brinelio (HB)* – įspaudžiant grūdintojo plieno arba volframo karbido rutuliuką; *Rokvelio (HR)* – įspaudžiant deimanto kūgį; *Vikerso (HV)* – įspaudžiant deimanto piramidę (11.1 pav.).

Brinelio metodu statmenai į tiriamojo metalo (arba ne metalo) paviršių specialiu Brinelio presu pamažu tam tikra jėga *P* (3000 kgf arba mažesne: 1000, 750 kgf) spaudžiamas nustatyto skersmens *D* (10 mm arba mažesnio) grūdintojo plieno rutuliukas. *Spaudimo jėgos P ir įspaudos sferinio paviršiaus ploto F santykis ir yra Brinelio kietumas.* Jis žymimas raidėmis *HB* ir išreiškiamas kgf/mm^2:

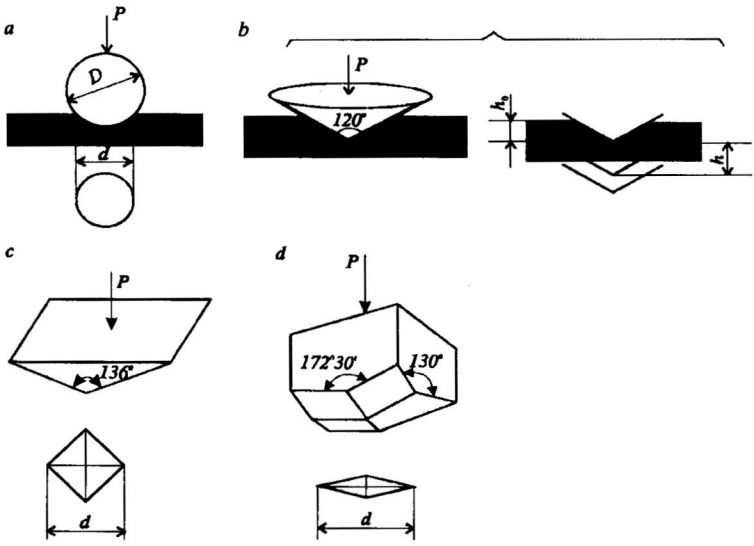
$$HB = P/F\ ; \qquad (11.8)$$

čia *P* – rutuliuką veikianti jėga, kgf; *F* – įspaudos paviršiaus plotas, mm^2.

Kietumas Brinelio vienetais (kgf/mm^2) tiesiogiai susijęs su medžiagos stipriu tempiant: plieno $\sigma = 0{,}55 \cdot HB$, pilkojo ketaus $\sigma = 0{,}1 \cdot HB$ ir t. t.

Rokvelio metodas pagrįstas įspaudos *gylio* matavimu. Šis metodas geras tuo, kad, naudojant skirtingas skales, galima nustatyti labai įvairių medžiagų kietumą.

Vikerso metodu, naudojant mažas apkrovas (1...100 kgf), galima išmatuoti ir *plonų sluoksnių kietumą*. Kietumo skaitinės vertės, nustatytos Brinelio ir Vikerso metodais, yra artimos (pvz., 200 HB atitinka 210 HV). Be to, Vikerso metodu galima nustatyti ir *atskirų medžiagos struktūrinių dalių kietumus*. Į Vikerso prietaisą gali būti įstatomas kitas indentorius – *Knupo deimantinė piramidė*. Šiuo metodu nustatytas kietumas žymimas *KHN*.



11.1 pav. Kietumo nustatymo būdų schemos:
a – Brinelio, *b* – Rokvelio, *c* – Vikerso, *d* – Knupo

Nemažos dalies smulkinimo įrenginių (plaktukinių, dezintegratorinių ir rotorinių trupintuvų; šachtinių, rutulinių ir srovinių malūnų) veikimo principas pagrįstas išorinės dinaminės, smūginės apkrovos į smulkinamą medžiagą poveikiu (daužymu).

6) smūginis tąsumas – tai medžiagos, veikiamos smūgine apkrova, geba priešintis suardymui. Suirimas yra galutinis medžiagos deformavimosi etapas smulkinimo metu, kai ji suskyla į makroskopines dalis. Yra du pagrindiniai suirimo būdai: tąsusis ir trapusis. Tąsiajam suirimui būdingos didelės plastinės deformacijos, kurios pristabdo irimą, todėl šis procesas vyksta laipsniškai ir tam tikrą laiką. Trapusis suirimas įvyksta staiga, be plastiškų deformacijų ir dažnai kai vidiniai įtempiai esti mažesni už medžiagos takumo ribą.

Medžiagos polinkį į trapųjį suirimą parodo jos smūginio tąsumo charakteristika, kurios skaitinės vertės nustatomos *smūginio lenkimo bandymais,* atliekamais švytuokliniais muštuvais (koperiais). Smūginis tąsumas nustatomas paruošus stačiakampį 10×10×55 mm dydžio medžiagos bandinį su tam tikros (*V*, *U* arba *T*) formos įpjova. Bandinys suardomas, smogus į jį muštuvu. Suardymui sunaudotas darbas *K*, J, apskaičiuojamas taip:

$$K = P \cdot (H - h); \qquad (11.9)$$

čia P – muštuvo sunkio jėga, N; H – pradinis pakėlimo aukštis, m; h – aukštis, iki kurio muštuvas pakilo suardęs bandinį, m.

Suardymui sunaudoto darbo K dalis, tenkanti bandinio skerspjūvio ties įpjova ploto F vienetui (m^2), ir yra skaitinė smūginio tąsumo KC vertė:

$$KC = K/F . \qquad (11.10)$$

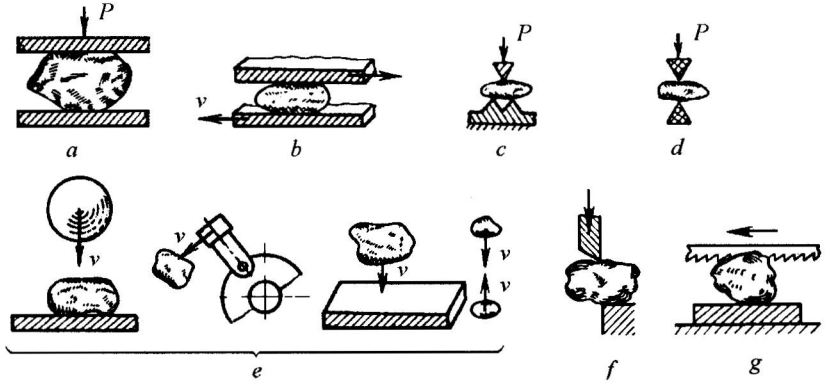
Tąsiai suirusios medžiagos irimo paviršius būna matinis, pluoštinis, su duobutėmis, trapiai suirusios medžiagos – blizgantis, kristalinis.

11.1.2. Mechaniniai kietųjų medžiagų smulkinimo būdai

Mechaniškai smulkinamose medžiagose atsiranda vidiniai įtempiai. Jiems viršijus medžiagos stiprumo ribą, ši suyra.

Smulkinimo įrenginiuose medžiaga dažniausiai tuo pačiu metu yra smulkinama keliais būdais (11.2 pav.), iš kurių vienas būna pagrindinis.

Gniuždymas – tai vidinių įtempių susidarymas veikiant išorinei jėgai dideliame smulkinamos medžiagos tūryje. Jų veikiama medžiaga suyra įvairaus dydžio ir formos gabaliukais per defektingiausias ir silpniausias vietas. Dažniausiai taikomas smulkinimo įrenginiuose, kai reikia susmulkinti *didelius ir stiprius* pradinės medžiagos gabalus.



11.2 pav. Medžiagų smulkinimo būdai:
a – gniuždymas, *b* – trynimas, *c* – lenkimas, *d* – skėlimas,
e – smūgiavimas, *f* – kirpimas, *g* – pjaustymas;
P – jėgos veikimo kryptis, v – darbo kūno judėjimo kryptis ir greitis

Skėlimas – tai medžiagos suardymas pleištiniais smulkinimo įrenginio elementais, kai didžiausi vidiniai įtempiai koncentruojasi pleištų veikimo vietose. Šiuo būdu susmulkintos medžiagos gabaliukai būna vienodesnių dydžių,

nors jų forma, kaip ir gniuždant, nėra geometriškai taisyklinga ir vienoda. Dažniausiai šį būdą stengiamasi taikyti kartu su gniuždymu.

Lenkimas – tai medžiagos suardymas lenkimo įtempiais (11.3 pav., *c*). Gabaliukai būna panašios formos ir dydžio kaip ir skeliant. Šiuo principu dažniausiai veikia kūginiai trupintuvai.

Smūgiavimas. Priklausomai nuo kontakto paviršiaus ploto dydžio smūgiai gali būti koncentruoti mažame medžiagos paviršiaus plote arba veikti didesnį paviršiaus plotą. Pirmuoju atveju gaunamos dinaminės apkrovos veikimo į medžiagą efektas būna panašus į skėlimą, antruoju – į gniuždymą. Smūginio poveikio efektas priklauso nuo smūgiuojančios masės dydžio ir smūgiavimo greičio. Būdas geriausiai tinka trapioms medžiagoms smulkinti.

Trynimas – tai medžiagos paviršinių sluoksnių suardymas veikiant gniuždymo, tempimo ir kirpimo jėgoms. Gaunami miltelių pavidalo produktai. Šis būdas dažnai taikomas įvairių tipų malūnuose ir yra derinamas su smūgiavimu ir gniuždymu.

Kirpimo ir pjaustymo būdai dažniausiai taikomi metalo apdirbimo ir maisto pramonėje, kai reikia gauti tam tikros formos ir dydžio daleles arba gabaliukus.

11.1.3. Teoriniai smulkinimo pagrindai

Kaip apskaičiuoti, kiek energijos reikia medžiagai susmulkinti, yra viena iš svarbiausių smulkinimo teorijos problemų. Pirmasis šią problemą bandė išspręsti P. Ritingeris, 1867 m. teoriškai išvedęs naujų paviršių dėsnį: *smulkinimui sunaudotas darbas yra proporcingas naujai susidarančio smulkinamos medžiagos paviršiaus dydžiui.* Pagrindiniai šios teorijos teiginiai yra paremti tuo, kad mechaniškai atskiriant vienas molekulių grupes nuo kitų reikalingos energijos sąnaudos tarpmolekuliniams ryšiams nutraukti, be to, susidarę nauji medžiagos paviršiai turi papildomos paviršinės kūno energijos. Ši suminė energija turi būti suteikiama kūnui ir gali būti išreiškiama darbu A:

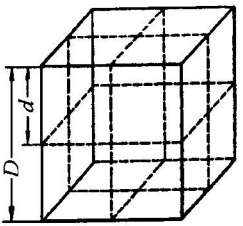
$$A = \sigma_P \cdot \Delta F \; ; \tag{11.11}$$

čia $\sigma_p = P/l$ – naujai susidariusio paviršiaus įtempimas (σ_p nepriklauso nuo kūno storio tol, kol jo matmenys nesumažėja iki molekulių dydžių); ΔF – medžiagos paviršiaus ploto padidėjimas, m^2.

P. Ritingeris matematiškai išnagrinėjo, kaip kinta suminis medžiagai susmulkinti reikalingo darbo kiekis A, didėjant kubo formos kūną į mažesnius kubelius suskaidančių plokštumų skaičiui, o kartu ir susmulkinimo laipsniui i, ir nustatė, kad kiekvienu kubo susmulkinimo iki mažesnių kubelių atveju bendras reikalingas darbas gali būti nustatomas iš lygties

$$A_n = 3 \cdot (i_n - 1). \tag{11.12}$$

Jei, pvz., smulkinimo laipsnis $i_n = 3$, tai bus reikalingos šešios plokštumos ir $A_3 = 3 \cdot A \cdot (3-1) = 6 \cdot A$ dydžio suminis darbas.



11.3 pav. Kubo suardymo schema

Imant skirtingam smulkinimo laipsniui i_1 ir i_2 gauti (smulkinant tą pačią medžiagą) reikalingų darbų santykį, gaunama:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{3 \cdot A \cdot (i_1 - 1)}{3 \cdot A \cdot (i_2 - 1)} = \frac{i_1 - 1}{i_2 - 1}. \qquad (11.13)$$

Kadangi smulkinimo laipsnio i vertės tiesiogiai priklauso nuo suminio naujų plokštumų paviršiaus dydžio, kai i_1 ir i_2 skaitinės vertės yra didelės (šimtų ir daugiau eilės, pvz., malimo procesuose), (11.13) lygtyje esančių „vienetų" galima nepaisyti. Tada galutinė P. Ritingerio naujų paviršių dėsnio išraiška gaunama tokia:

$$\frac{A_1}{A_2} \approx \frac{i_1}{i_2} \approx \frac{F_1}{F_2}. \qquad (11.14)$$

Vienas didžiausių P. Ritingerio teorijos trūkumų yra tai, kad neįvertinama ta smulkinimo energijos dalis, kuri yra reikalinga medžiagai deformuoti, iki ji suirs dėl gniuždymo, skėlimo, lenkimo arba smūgių.

Tūrių dėsnis, pasiūlytas V. Kirpičiovo ir Kiko, yra pagrįstas Huko dėsniu ir tampriosiomis deformacijomis, atsirandančiomis medžiagoje smulkinimo metu. Pagal tampriųjų deformacijų dėsningumus nesunkiai įrodoma, kad tampriųjų deformacijų metu atliekamas darbas yra nustatomas iš išraiškos

$$A = \sigma^2 \cdot V / 2 \cdot E; \qquad (11.15)$$

čia σ – vidiniai įtempiai, N/m^2; V – smulkinamos medžiagos pradinis tūris, m^3; E – medžiagos tamprumo modulis, N/m^2.

Tada dviejų tos pačios vienalytės medžiagos geometriškai panašių kūnų deformacijų darbų santykis yra:

$$A_1 / A_2 = \sigma^2 \cdot V_1 \cdot 2 \cdot E / \left(2 \cdot E \cdot \sigma^2 \cdot V_2\right) = V_1 / V_2. \qquad (11.16)$$

Kadangi $\rho = m/V$, tai $V = m/\rho$, todėl tūrių dėsnį galime užrašyti taip:

$$A_1/A_2 = V_1/V_2 = m_1/m_2 . \qquad (11.17)$$

Taigi tūrių dėsnis teigia, kad *energija, reikalinga tiek pat smulkiai susmulkinti vienalyčiams tos pačios medžiagos skirtingo dydžio, bet geometriškai panašiems kūnams, yra tiesiai proporcinga tų kūnų tūriams arba masėms.*

Kirpičiovo ir Kiko dėsnis neįvertina energijos, reikalingos naujiems paviršiams susidaryti, paviršinės energijos ir kitų papildomų energijos sąnaudų (šiluminių, akustinių ir pan.), todėl jis geriau atspindi tik trupinimui reikalingas energijos sąnaudas, kai smulkinimo laipsnio *i* vertės yra nedidelės ir kai nauji paviršiai padidėja palyginti nedaug. Malimo procesų energijos sąnaudoms nustatyti šis dėsnis netinka.

Aktyvus Kirpičiovo ir Kiko teorijos šalininkas Stedleris šią teoriją bandė išplėtoti, atsižvelgdamas į reikalingą tūrinį pradinių *D* dydžio gabalų susmulkinimo iki galutinio dalelių dydžio *d* laipsnį (*a*), vienkartinį tūrinį susmulkinimo laipsnį (*r*), reikalingą smulkinimo skaičių (*n*) ir kritinės ardomosios jėgos veikimo kelią, išreiškiamą maksimalios deformacijos dydžiu (*c*) medžiagos suardymo metu. Jis matematiškai išvedė medžiagai susmulkinti reikalingo darbo lygtį:

$$A = 3 \cdot k \cdot c \cdot r^n \cdot D^3 . \qquad (11.18)$$

Kadangi *k*, *c* ir *r* yra eksperimentiškai nustatomos konstantos, tai, pasak Stedlerio, smulkinimo darbas yra sudėtinga smulkinimo stadijų skaičiaus *n* funkcija.

L. Levensonas, remdamasis Kirpičiovo ir Kiko teorija, pasiūlė formulę smulkinimo darbui nustatyti, kurioje įvertinami medžiagoje kritinės ardomosios jėgos sukelti ribiniai įtempiai σ_r bei smulkinimo laipsnis *i*:

$$A_o = \frac{\sigma_e^2}{2 \cdot E} \cdot (D^3 - d^3) = \frac{\sigma_r^2 \cdot d^3}{2 \cdot E} \cdot (i^3 - 1) . \qquad (11.19)$$

Nors kartais pagal šią formulę apskaičiuotos rupiojo trupinimo trupintuvų darbo vertės yra artimos praktinėms, tačiau L. Levensono teiginys, kad deformuojamas *D* dydžio gabalas suyra į smulkias daleles, kurių dydis artėja prie nulio, yra akivaizdus šio dėsnio trūkumas, kurį pripažino ir pats autorius.

Houlteinas jau 1923 m., remdamasis eksperimentų duomenimis, nurodė, kad, smulkinant medžiagą, energija sunaudojama ne tik naujiems paviršiams sudaryti, bet ir medžiagos deformacijos iki jos suirimo šilumai, medžiagos trinties į darbinius paviršius šilumai ir kad šių energijos sąnaudų neįvertina nė viena iš anksčiau pateiktų teorijų. Todėl viena paprasta formule neįmanoma tiksliai apibūdinti įvairių medžiagų smulkinimo įvairiais būdais energijos sąnaudų.

Panašią išvadą padarė 1930 m. P. Rebinderis, kurio teigimu,

$$A = k_{p1} \cdot \Delta F + k_{p2} \cdot \Delta V \; ; \qquad (11.20)$$

čia k_{p1} – koeficientas, įvertinantis laisvosios paviršinės energijos kiekį; ΔF – suyrant kūnui naujai susidarantis paviršius; k_{p2} – koeficientas, įvertinantis tą potencinės energijos kiekį, kurį įgauna kietasis kūnas, veikiamas išorinių jėgų, ir kuris pereina į šiluminę energiją; ΔV – deformuojama kietojo kūno tūrio dalis.

F. Bondo teorija teigia, kad energija, perduodama kūnui jį gniuždant, iš pradžių pasiskirsto visame jo tūryje ir todėl yra proporcinga D^3, tačiau nuo plyšelio atsiradimo momento ši energija koncentruojasi paviršiuje, prie plyšelio kraštų ir tada ji tampa proporcinga D^2. Remiantis šiais teiginiais, gabaliukui suardyti reikalingas darbas gali būti išreiškiamas formule:

$$A_I = k_P \cdot D^{2,5} . \qquad (11.21)$$

Tada smulkinant masės M medžiagą nuo pradinio gabaliukų dydžio D iki galutinio dydžio d sunaudojamas darbas

$$A_o = \frac{k_p}{i_o^{0,5} - 1} \cdot \left(\frac{1}{d^{0,5}} - \frac{1}{D^{0,5}}\right) \cdot \frac{M}{\rho} \; ; \qquad (11.22)$$

čia i_o – pastovus vienkartinio smulkinimo laipsnis; ρ – smulkinamos medžiagos tankis, kg/m^3.

Bondo dėsnis geriausiai aprašo smulkiojo trupinimo ir rupiojo malimo energijos sąnaudas.

P. Sidenko, analizuodamas smulkiojo trupinimo procesus ir remdamasis techninės mechanikos dėsniais, įrodė, kad, palaipsniui smulkinant daleles, savitosios energijos sąnaudos, pereinant nuo vieno smulkinimo karto prie kito ir mažėjant dalelių dydžiui, turi mažėti, o ne išlikti pastovios, kaip teigiama Ritingerio teorijoje. Todėl smulkinant medžiagą naujai susidarančio paviršiaus dydis, nors ir yra svarbi smulkiagrūdės medžiagos charakteristika, tačiau tarp jo ir jam susidaryti reikalingos energijos nėra tiesioginio ryšio, kaip tai aiškinama Ritingerio teorijoje (tai ir yra didžiausias Ritingerio teorijos trūkumas). P. Sidenko įrodė, kad jei dydžio D gabalui susmulkinti iki d dydžio dalelių reikalingas n smulkinimų skaičius $\left(n = 3 \cdot lg(i)/lg(a_0)\right)$, tai suminį smulkinimui reikalingą darbą A galima apskaičiuoti iš lygties

$$A = (\sigma_r \cdot D^3/2E) \cdot (3lg\, i/lg\, a_o); \qquad (11.23)$$

čia i – suminis smulkinimo laipsnis; a_o – vienkartinio smulkinimo laipsnis; σ_r – kritinis medžiagos įtempis jos suirimo metu.

Išvedant šią lygtį taip pat laikoma, kad smulkinama medžiaga yra vienalytė, absoliučiai tampri ir suyra į taisyklingos (kubelio) formos gabaliukus. Iš tikrųjų smulkinimo procese šie parametrai yra kintami, todėl ir (11.23) formulė negali tiksliai aprašyti smulkinimo proceso energijos sąnaudų, tačiau ji įgalina palyginti įvairių smulkinimo įrenginių ekonominį efektyvumą ir numatyti priemones jam padidinti.

Iš (11.23) lygties matyti, kad smulkinimui reikalinga energija, mažėjant a_o (t. y. vienkartinio smulkinimo laipsniui), didėja.

Suardomas kūnas gali pasidalyti mažiausiai į dvi dalis. Šiuo atveju smulkinimo energijos sąnaudos bus maksimalios, nes, kai $a_o = 2$,

$$A_{max} = 5 \cdot (\sigma_r \cdot D^3 / E) \cdot lg\, i\,. \qquad (11.24)$$

Panagrinėkime, kaip kinta maksimalios energijos sąnaudos, smulkinant stambiai ir smulkiai (trupinant ir malant). Stambiai trupinant, kai $i = 4$,

$$A_{max} = 3 \cdot \sigma_r^2 \cdot D^3 / E\,. \qquad (11.25)$$

Tuo tarpu malimo maksimalios energijos sąnaudos, kai $i = 100$,

$$A_{max} = 10 \cdot \sigma_T^2 \cdot D^3 / E\,. \qquad (11.26)$$

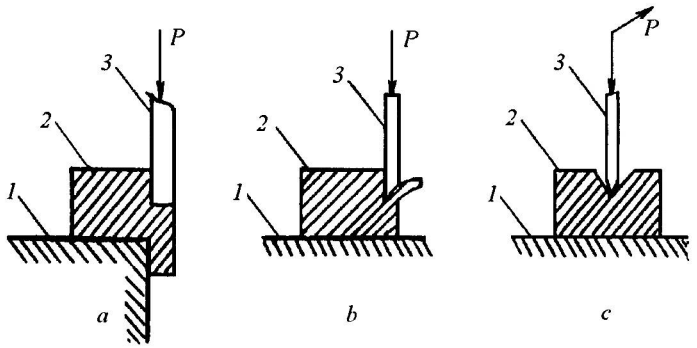
Taigi, teoriškai nagrinėjant, savitosios malimo energijos sąnaudos turėtų būti tik apie 3...4 kartus didesnės už rupiojo ir vidutinio trupinimo savitąsias energijos sąnaudas. Faktiškai jos būna didesnės 15...20 kartų. Toks didelis smulkiojo malimo energijos sąnaudų padidėjimas yra paaiškinamas ne tik struktūros defektų skaičiaus mažėjimu, o kartu ir medžiagos stiprumo didėjimu, mažėjant dalelių dydžiui, bet ir per daug susmulkintos medžiagos dalelių neigiamu poveikiu smulkinimo procesams: smulkinamų stambesnių dalelių atskyrimo elastingu sluoksniu, dalelių agregacija, jų adhezija prie darbinių paviršių. Trupinimo procesuose gabalai per 1...3 kartus susmulkinami iki reikiamų dydžių, be to, paprastai prieš trupintuvus įrengiami sijotuvai, kuriais iš smulkinamos medžiagos pakankamai smulkios dalelės atskiriamos dar prieš trupinimą, todėl trupintuvuose per daug smulki frakcija turi mažesnę neigiamą įtaką smulkinimo procesui, negu malūnuose, kuriuose dalelė smulkinama 100 ir daugiau kartų ir pakankamai smulkus produktas smulkinimo zonoje išlieka ilgai. Todėl tobulinant smulkiojo malimo procesus labai svarbu pakankamai smulkią frakciją laiku išskirti iš malamos medžiagos, į smulkinimo kamerą medžiagą tiekti maždaug vienodo stambumo ir susmulkinti ją kuo mažesniu poveikių skaičiumi.

(11.23) lygtis įgalina apytiksliai nustatyti trupinimui reikalingas energijos sąnaudas ir trupintuvui reikalingą elektros variklio galią N_{max}, kW:

$$N_{max} = 1{,}39 \cdot 10^{-6} \frac{\sigma_r \cdot Q}{\eta \cdot E \cdot \rho} \cdot lg\, i\,; \qquad (11.27)$$

čia σ_r – trupinamos medžiagos stipris gniuždant, N/m^2; E – medžiagos tamprumo modulis, N/m^2; Q – trupintuvo valandinis našumas, kg/h; ρ – trupinamos medžiagos tankis, kg/m^3; i – smulkinimo laipsnis; η – bendras trupintuvo naudingumo koeficientas, kurio vertė ~0,6.

Atskirą smulkinimo procesų grupę sudaro *pjaustymas*, kurio tikslas – susmulkinti medžiagą į vienodo dydžio ir vienodos geometrinės formos daleles. Skiriamos trys pjaustymo atmainos (11.4 pav.): *pjaustymas puansonu, pjaustymas kirtimu* (*b*) ir *pjaustymas peiliu* (*c*).



11.4 pav. Pjaustymo būdai: *a* – puansonu (*1* – matrica, 2 – medžiaga, *3* – puansonas); *b* – drožtuvu (*1* – atraminė plokštė, *2* – medžiaga, *3* – drožtuvas); *c* – peiliu (*1* – atraminė plokštė, *2* – medžiaga, *3* – peilis); *P* – išorinė jėga ir jos veikimo kryptys

Puansonas, veikiamas jėgos *P*, statmenos darbinei briaunai, nukerpa reikiamo dydžio medžiagos dalį. Puansonu dažniausiai pjaustomi kieti (pvz., maisto) produktai. Kirtimo įrankis kaip pleištas veikia smulkinamą medžiagą viena kryptimi ir padaliją ją į reikiamo dydžio dalis arba drožles. Taip smulkinamos kietos arba plastiškos medžiagos. Pjaustant peilis kaip pleištas juda ne tik statmenai, bet ir lygiagrečiai darbinės kylio briaunos atžvilgiu.

Pirmojoje medžiagos pjaustymo stadijoje gniuždomas nedidelis paviršiaus plotas, sutankinamas paviršinis sluoksnis ir kontaktinėje zonoje sudaromi gniuždymo įtempiai, o antrojoje stadijoje susidaro nauji paviršiai. V. Goriačkino teigimu, pjaustymo darbas gali būti apibūdinamas formule:

$$A = A_{gn} + A_n = \mathfrak{э} \cdot h_{gn} / h + P_{pj} \cdot \left(h - h_{gn}\right); \qquad (11.28)$$

čia A_{gn} – medžiagos paviršinio sluoksnio suspaudimo darbas, J; A_n – naudingas pjovimo darbas, J; ə – sąlyginis medžiagos suspaudimo pleištu modulis, J; h_{gn} – suspausto sluoksnio storis, m; h – pradinis medžiagos sluoksnio storis, m; P_{pj} – pjovimo apkrova, N.

Pjovimą sukelianti apkrova niutonais, išreikšta pjaunančiojo pleišto išilginiam metrui, vadinama savitaja pjovimo apkrova. Nustatyta, kad, pvz., pjaustant bulves, ji sudaro 600...700 N/m, pjaustant burokėlius, – 900...1600 N/m, o pjaustant morkas, – 1400...1600 N/m. Sąlyginis medžiagos suspaudimo pleištu modulis ə nustatomas eksperimentiškai, nes jo vertės priklauso ne tik nuo pjaustomos medžiagos fizikinių ir mechaninių savybių, bet ir nuo pleišto tipo bei kitų veiksnių.

11.1.4. Smulkinimo įrenginių skirstymas, smulkinimo stadijos ir ciklai

Smulkinimo įrenginiai skirstomi pagal įvairius požymius: smulkinimo būdą, smulkinimo laipsnį ir pan. Chemijos ir maisto pramonėje naudojamus smulkinimo įrenginius pagal smulkinimo būdą ir produkto dalelių geometrinę formą bei dydį galima suskirstyti į tris pagrindines grupes: 1) trupintuvus, 2) malūnus, 3) pjaustymo ir trynimo įrenginius.

Trupintuvais smulkinami dideli (iki 1500 mm) pradiniai gabalai, o susmulkintas produktas gaunamas netaisyklingos formos trupinėlių, didesnių kaip 1 mm, pavidalo. Trupintuvų optimalus smulkinimo laipsnis yra nedidelis ir priklausomai nuo trupintuvo tipo bei konstrukcijos svyruoja nuo 3 iki 40 ($i = 3...40$). Pagal veikimo principą skiriami: a) žiauniniai, b) kūginiai, c) valciniai, d) plaktukiniai, e) rotoriniai trupintuvai, f) bėgūnai.

Malūnais smulkinami pradiniai nedideli (5...10 mm dydžio) medžiagos trupinėliai arba grūdeliai iki smulkių miltelių. Smulkinimo laipsnis i yra didelis – nuo 100 ir net iki kelių šimtų. Pagal veikimo principą skiriami: a) rutuliniai (cilindriniai, kūginiai, išcentriniai, „Aerofol“ ir „Hidrofol“), b) plaktukiniai (aerospragiliniai ir šachtiniai), c) srovinės energijos; d) pneumatiniai; e) vibraciniai; f) žiediniai; g) planetiniai; h) kavitaciniai; i) koloidiniai; k) biseriniai; l) peiliniai; m) valciniai malūnai ir dezintegratoriai bei dismembratoriai.

Pjaustymo ir trynimo įrenginiais dažniausiai smulkinamos minkštos, didelio drėgnio žaliavos (daržovės, vaisiai ir pan.) maisto pramonėje. Pagal veikimo principą skiriami: a) pjaustymo įrenginiai; b) pertrynimo įrenginiai (trintuvai); c) mechaniniai homogenizatoriai.

Gali būti smulkinama *sausuoju būdu* (pvz., rupusis ir vidutinis trupinimas) ir *šlapiuoju būdu* (dažnai smulkiojo trupinimo arba malimo atvejais). *Sausai* smulkinama oro arba inertinių dujų aplinkoje (kai smulkinamos besioksiduojančios, degios arba sprogios ir toksiškos medžiagos). *Šlapiai* smul-

kinama (vandens arba kitų skysčių terpėje) ruošiant suspensijas, koncentruojant rūdas flotacijos būdu, esant dideliam medžiagos drėgniui, esant smulkinamoje medžiagoje agregaciją didinančių priemaišų, taip pat kai smulkinant būtina išvengti dulkių.

Smulkinimas gali būti *periodinis* arba *nuolatinis*. *Periodiškai* smulkinama, esant nedideliam gamybos našumui, nes šis būdas ekonomiškai neefektyvus, produktas gaunamas labai įvairios granuliometrinės sudėties, jame yra daug per stambių ir per smulkių frakcijų, smulkinama medžiaga gali smarkiai įkaisti (nes smulkinama uždarame tūryje) ir agreguotis.

Nuolatinis smulkinimas gali būti *atviro arba uždaro ciklo*. *Atvirasis ciklas* dažniausiai taikomas rupiajam arba vidutiniam smulkinimui. Medžiaga per smulkinimo įrenginį pereina tik vieną kartą, todėl gautame produkte būna įvairaus dydžio dalelių.

Smulkinant *uždaruoju ciklu*, pakankamai smulki frakcija nuolat šalinama iš smulkinimo įrenginio ir tai padidina smulkinimo proceso efektyvumą. Trupinant pakankamai smulki frakcija atskiriama sijotuvais, o malant – oriniais arba hidrauliniais separatoriais. Per rupi, nepakankamai susmulkinta medžiaga grąžinama papildomai smulkinti.

Kai pradinėje medžiagoje yra daug pakankamai smulkių dalelių (kartais net 30...40 %), tai, smulkinant tiek atviruoju, tiek uždaruoju ciklu, medžiaga iš anksto suklasifikuojama.

Didėjant susmulkinimo laipsniui i, savitosios energijos sąnaudos sparčiai didėja, o smulkinimo įrenginio našumas mažėja. Todėl kiekvienas smulkinimo įrenginys turi *optimalų smulkinimo laipsnį* i_{opt} (pvz., rupiojo trupinimo žiauninių bei kūginių trupintuvų $i_{opt} = 3...5$, vieno rotoriaus plaktukinių trupintuvų $i_{opt} = 10...15$, dviejų rotorių trupintuvų $i_{opt} = 30...40$ ir t. t.). Jei reikalingas didelis susmulkinimo laipsnis, tai smulkinama keliomis stadijomis, einant laipsniškai nuo rupiojo prie vidutinio ir smulkiojo smulkinimo, kiekvienoje stadijoje parenkant efektyviausiai ir mažiausiomis savitosiomis energijos sąnaudomis dirbančius smulkinimo įrenginius. Paprastai yra 2...3 trupinimo ir 3...4 trupinimo ir malimo stadijos.

Viena stadija trupinamos medžiagos, kurių pradinių gabalų dydžiai neviršija 400...450 mm, nedidelio našumo cechuose arba įmonėse.

Dviem stadijomis trupinamos medžiagos, kurių pradinių gabalų dydis siekia 700...1000 mm. Tokios medžiagos neįmanoma viename trupintuve susmulkinti į standartines 10...20; 20...40 ir 40...70 mm frakcijas. Trupinant stambius pradinės medžiagos gabalus, susidaro didelis kiekis stambiausios frakcijos, kuriai susmulkinti įrengiamas antrasis trupintuvas.

Trimis stadijomis trupinamos medžiagos didelio našumo įmonėse, kai pradiniai gabalai gali būti 1000...1200 mm dydžio. Trečiojoje trupinimo stadijoje dažniausiai trupinama kūginiu trupintuvu su lėkštu kūgiu ir uždaru ciklu.

Tai įgalina gauti didesnį kiekį ir tolygesnės granuliometrinės sudėties smulkesnę frakciją netgi smulkinant stiprias gamtines uolienas.

Mažai abrazyvias ir nedidelio stiprumo nuosėdines uolienas (mergelius, opoką, trepelį, kreidą ir pan.) geriausia trupinti *rotoriniais trupintuvais*, į kuriuos galima pakrauti gana didelius pradinės medžiagos gabalus ir kurių smulkinimo laipsnis ($i = 30...40$) didesnis nei žiauninių bei kūginių trupintuvų ($i = 3...5$). Šiuo atveju I ir II trupinimo stadijos atliekamos kartu viename įrenginyje, todėl sumažėja savitosios smulkinimo energijos sąnaudos.

11.1.5. Bendrieji reikalavimai smulkinimo įrenginiams

Nors smulkinimo įrenginių yra labai įvairių, visi jie turi tenkinti šiuos pagrindinius reikalavimus: 1) smulkinimo metu turi susidaryti kuo mažiau dulkių; 2) gaunamo produkto dalelės turi būti kiek galima vienodesnio dydžio; 3) įrenginio konstrukcija turi būti tokia, kad būtų galima greitai ir lengvai reguliuoti arba keisti smulkinimo laipsnį.

Pakankamai susmulkintas produktas turi būti kuo greičiau pašalinamas iš smulkinimo įrenginio. Smulkinimo įrenginio konstrukcija turi būti tokia, kad galima būtų greitai ir lengvai pakeisti susidėvėjusias dalis. Trupintuvuose turi būti įrengti tokie silpnesni, konstrukciškai lengvai pakeičiami elementai, kad avariniu atveju, patekus per daug stiprios ir kietos medžiagos pašaliniam daiktui (pvz., plaktukui, raktui, veržlei ir pan.), nesugestų visas įrenginys. Smulkinimo įrenginio masė turi būti minimali, o konstrukcija – kuo paprastesnė ir patikimesnė.

Smulkinimo būdas ir įrenginio konstrukcija parenkami atsižvelgiant į smulkinamų medžiagų stiprumą, kietumą, elastingumą, trapumą, drėgnumą, lipnumą, terminį atsparumą, cheminį aktyvumą, toksiškumą, degių arba sprogstamų mišinių susidarymo galimybes, taip pat į reikiamą galutinio produkto granuliometrinę sudėtį, geometrinę formą, grynumą, baltumo laipsnį, piltinį tankį, tekumą ir kitas technologines savybes. Į visus šiuos rodiklius reikia atkreipti dėmesį, parenkant efektyviausius smulkinimo įrenginius.

Smulkinimo įrenginių darbo metu būtina nuolat kontroliuoti pagrindinius smulkinimo rodiklius: smulkinimo laipsnį i (trupintuvuose) arba dalelių savitąjį paviršių S (m^2/kg) (malūnuose), ir prireikus laiku juos pakoreguoti. Trupintuvuose i gali sumažėti dėl darbinių trupinimo plokščių paviršiaus išsidėvėjimo, malūnuose – dėl malimo kūnų ir išklojos plokščių susidėvėjimo.

Todėl, kad mažiau išsidėvėtų smulkinimo įrenginių darbiniai paviršiai, smulkinant abrazyvines ir kietas medžiagas turi būti ribojami darbinių paviršių judėjimo greičiai, naudojamos greitai nuimamos ir pakeičiamos detalės, darbiniai paviršiai išklojami apsauginėmis plokštėmis. Esant galimybei, turi būti taikomas šlapiasis smulkinimo būdas; dilimui sumažinti naudojami korozijos inhibitoriai; tuo pačiu metu smulkinamos abrazyvinės ir minkštos me-

džiagos (abrazyvinės medžiagos smulkina minkštas, o minkštos poliruoja abrazyvinių medžiagų paviršių, taip sumažindamos jų abrazyvumą).

Smulkinant degias ir sprogias medžiagas (pvz., kietąjį kurą – anglis, antracitą), labai svarbu griežtai laikytis darbo saugos reikalavimų. Projektuojant, parenkant ir eksploatuojant smulkinimo įrenginius, reikia įvertinti smulkinamų medžiagų dulkių ir oro mišinių apatines ir viršutines sprogumo ribas, užsiliepsnojimo temperatūrą, medžiagų įsielektrinimą. Smulkinimo įrenginių korpusai, transporto priemonės (transporteriai, vamzdynai) turi būti mechaniškai stiprūs, hermetiški, juose turi būti įmontuotos apsauginės membranos. Malimo kūnai ir malūnų korpusai turi būti pagaminami iš tokių medžiagų, kurios nuo smūgių nekibirkščiuoja. Apsaugai nuo atmosferinės ir statinės elektros krūvių smulkinimo įrenginiai turi būti įžeminti.

11.1.6. Trupintuvai

11.1.6.1. Žiauniniai trupintuvai

Naudojami stiprioms ir vidutinio stiprumo medžiagoms smulkinti. Į trupintuvą patenkantys gabalai turi būti ne didesni kaip 0,85 krovimo angos pločio.

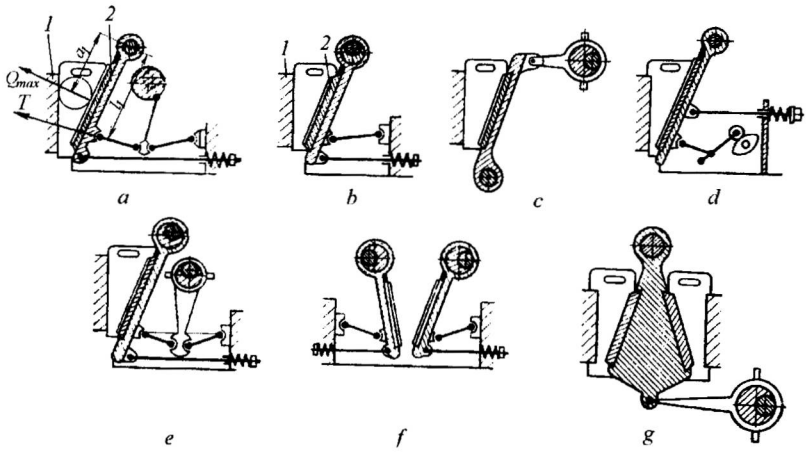
Žiauniniuose trupintuvuose pamažu judanti žemyn medžiaga gniuždoma ir trinama tarp dviejų briaunotų metalinių plokščių su pleištiniais iškilimais, vadinamų žiaunomis, kurių viena nejuda, o kita yra periodiškai stumdoma pirmyn ir atgal. Judant žiaunai į priekį, medžiaga smulkinama, o judant atgal – susmulkinta medžiaga iškrinta. Žiauninių trupintuvų yra įvairių konstrukcijų, įvairūs ir jų veikimo principai: yra per 30 skirtingų tipų žiauninių trupintuvų. Žiauniniai trupintuvai gali būti klasifikuojami pagal šiuos du požymius:

1) pagal judamosios žiaunos judėjimo pobūdį – į *paprasto judesio* (11.6 pav., *a, c, d* ir *g*) ir *sudėtingo judesio* (11.6 pav., *b, e* ir *f*);

2) pagal judamosios žiaunos įtvirtinimo veleno padėtį – su *viršuje* įtvirtintu (11.6 pav., *a, b, d, e* ir *f*) ir su *apačioje* įtvirtintu (11.6 pav., *c*) žiaunos velenu.

Paprasto žiaunos judesio trupintuvų judamoji žiauna yra užmauta ant pastovaus skersmens ašinio veleno ir stumdoma sukant varomojo švaistiklinio veleno ekscentrinę dalį. Sudėtingo judesio trupintuvų judamoji žiauna užmauta ant veleno, kuris kartu yra ir varantysis, ekscentrinės dalies.

Paprasto žiaunos judesio trupintuvų bet kuris judamosios žiaunos taškas brėžia erdvėje nedidelį lanką, artimą tiesei, todėl galima sakyti, kad judamoji žiauna yra stumdoma tik *horizontalia kryptimi* pirmyn ir atgal.



11.5 pav. Žiauninių trupintuvų veikimo schemos: *a* – paprasto judesio, su viršuje įtvirtinta judamąja žiauna, *b* – sudėtingo judesio, su viršuje įtvirtinta judamąja žiauna, *c* – paprasto judesio, su apačioje įtvirtinta judamąja žiauna, *d* – paprasto judesio, su viršuje įtvirtinta judamąja žiauna, kai jėga perduodama per ritinėlius, *e* – sudėtingo judesio, su viršuje įtvirtinta judamąja žiauna, kai judesys perduodamas per švaistiklį, *f* – sudėtingo judesio, su dviem viršuje įtvirtintomis judamosiomis žiaunomis, *g* – paprasto judesio, su viršuje įtvirtinta judamąja žiauna, su dviem trupinamosiomis plokštėmis ir dviem krovimo angomis

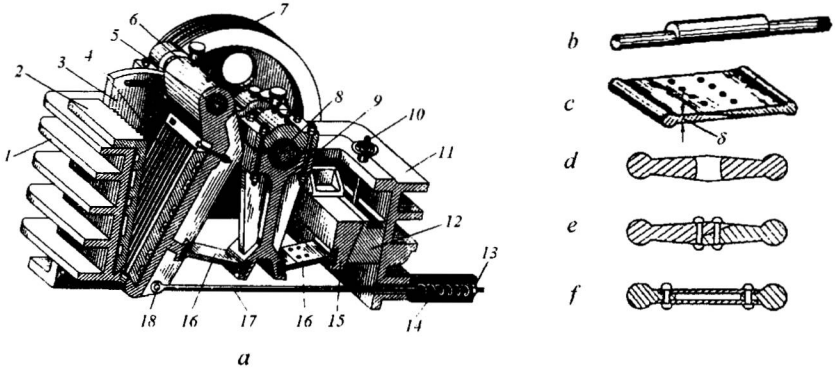
Sudėtingo judesio trupintuvų judamosios žiaunos viršutiniai įtvirtinimo taškai brėžia trajektoriją, artimą apskritimui, o viduriniai ir apatiniai – elipsę, taigi judamoji žiauna tuo pačiu metu juda *ne tik horizontalia*, bet ir *vertikalia kryptimi.* Todėl sudėtingo judesio trupintuvuose medžiaga ne tik skeliama, kerpama, pjaunama ir gniuždoma, bet ir intensyviai *trinama*; susidaro daug smulkiosios frakcijos. Didelis smulkiosios frakcijos kiekis yra pageidautinas, jei medžiaga toliau smulkinama malant, tačiau gali būti nepageidautinas ir sudaryti atliekas lydymo (pvz., stiklo) procesuose, gabaliukų pavidalo medžiagos degimo (pvz., šachtinėse kalkių degimo krosnyse) procesuose, todėl į judamosios žiaunos judesio pobūdį reikia atsižvelgti, parenkant tinkamiausio tipo medžiagos trupinimo įrenginį.

Trupintuvuose *su viršuje įtvirtinta judamąja žiauna* ilgiausią kelią nueina *apatinė* žiaunos dalis, todėl trupintuvo *iškrovimo angos plotis darbo metu kinta* ir galutinio produkto gabaliukai gaunami nevienodo dydžio, įvairios granuliometrinės sudėties. Tačiau šio tipo trupintuvai smulkina tolygiau, be didelių dinaminių apkrovų į stambiausius gabalus, smulkesniems gabalams susmulkinti apatinėje dalyje užtenka mažesnės absoliučiosios išorinės apkrovos, susmulkintą medžiagą lengviau iškrauti, todėl trupinimo procesuose šio tipo trupintuvai naudojami dažniausiai.

Trupintuvuose su apačioje įtvirtinta judamąja žiauna ilgiausią kelią nueina viršutinė žiaunos dalis, o iškrovimo angos plotis išlieka pastovus. Todėl gaunama vienodesnės granuliometrinės sudėties susmulkinta medžiaga, tačiau ją sunkiau iškrauti, trupintuvo apatinėje dalyje medžiaga gali užsikimšti, sumažėja trupintuvo našumas ir padidėja savitosios smulkinimo energijos sąnaudos. Be to, judamajai žiaunai ilgiausia trajektorija smūgiuojant į stambiausius gabalus, susidaro labai didelės dinaminės apkrovos (1000 jėgos tonų ir daugiau), sukeliančios trupintuvo sukrėtimus, vibracijas. Todėl žiauniniai trupintuvai su apačioje įtvirtinta judamąja žiauna gaminami nedidelio našumo ir dažniausiai naudojami tik tyrimams.

Pramonėje dažniausiai naudojami paprasto ir sudėtingo judesio žiauniniai trupintuvai su viršuje įtvirtinta judamąja žiauna (11.5 pav., *a* ir *b*). Jų pagrindiniai konstrukciniai elementai pateikti 11.6 ir 11.7 pav.

Žiauninio trupintuvo su paprasto judesio žiauna (11.6 pav.) visos dalys sumontuotos masyviame stove *1*. Mažų trupintuvų briaunoti stovai išliejami iš ketaus arba plieno, didelių – briaunota konstrukcija suvirinama iš storų (25...50 mm) plieno lakštų arba sumontuojama iš atskirų lietų briaunotų dalių, sujungiamų iki 300...400 °C temperatūros įkaitintais varžtais.



11.6 pav. Paprasto judesio žiauninis trupintuvas: konstrukcinė schema (*a*), švaistiklinio mechanizmo ekscentrinio veleno (*b*) ir skėtimo plokštės (*c*) schemos bei susilpnintų skėtimo plokščių skerspjūviai *d*, *e* ir *f* (*d* – skylėtos, *e* ir *f* – sukniedytos); 1 – masyvus briaunotas stovas, 2 – nejudamoji žiauna, 3 – šoninė plokštė, 4 – trupinimo plokštė, 5 – judamosios žiaunos velenas, 6 – judamoji žiauna, 7 – smagratis, 8 – ekscentrinis varantysis velenas, 9 – švaistiklis, 10 – judamosios žiaunos eigos reguliavimo sraigtas, 11 – atraminis stovas, 12 – vertikaliai kilnojama pleištinė plokštė, 13 – skėtimo plokščių laikymo spyruoklė, 14 – spyruoklės lizdas, 15 – horizontaliąja kryptimi judanti eigos reguliavimo plokštė, 16 – skėtimo plokštės, 17 – trauklė

Stovui priskiriamos ir šoninės plokštės *3* (11.6 pav. vaizdumo dėlei priekinė šoninė plokštė neparodyta). Varžtais ir šoninėmis plokštėmis prie stovo yra pritvirtinama briaunota plokštė–nejudamoji žiauna *2*. Judamoji žiauna *6* yra užmauta ant veleno *5*, įmontuoto guoliuose stovo viršutinėje dalyje. Prie judamosios žiaunos varžtais per tarpiklius, užtikrinančius gerą kontaktą, yra tvirtinama trupinimo plokštė *4*. Nejudamoji žiauna ir judamosios žiaunos trupinimo plokštė *4* gaminamos iš labai kietų lydinių – manganu (12...14 % Mn) legiruoto plieno arba baltojo ketaus, jų paviršius daromas rifliuotas (briaunų aukštis *h* siekia 0,25...0,5 žingsnio *s*; kuo mažesnis *s*, tuo vienodesnio dydžio gaunami produkto gabaliukai). Plokštės briaunų iškilimai turi išsidėstyti priešais kitos plokštės briaunų įdubimus, kad smulkinamojoje medžiagoje susidarytų lenkimo įtempiai. Žiaunų paviršių rifliavimas įgalina 10...20 % padidinti trupintuvo našumą, prailgina trupinimo plokščių eksploatavimo trukmę, gaunama vienodesnė susmulkinto produkto granuliometrinė sudėtis.

Judamosios žiaunos užpakalinė dalis stiprumui padidinti taip pat daroma briaunota. Ji periodiškai stumiama link nejudamosios žiaunos ir atitraukiama nuo jos, sukantis varančiajam velenui ir jo ekscentrinei daliai judant apskritimu, kurio spindulys vadinamas *ekscentricitetu*. Ant varančiojo veleno ekscentrinės dalies *8* yra užmauti rutuliniai riedėjimo guoliai, kuriuos apgaubia švaistiklio *9* gaubtas, suveržiamas su švaistikliu varžtais. Judant ekscentrinei daliai žemyn, švaistiklis per skėtimo plokštes *16* stumia judamąją žiauną link nejudamosios. Tuo metu medžiaga trupintuve yra smulkinama (*darbinė judamosios žiaunos eiga*). Paprasto judesio žiauniniuose trupintuvuose medžiaga smulkinama tik judamajai žiaunai judant link nejudamosios, todėl tik tuo metu labiausiai apkraunamos žiaunos, velenai ir kitos trupintuvo detalės. Žiaunai grįžtant atgal, mechaninių apkrovų beveik nėra, todėl žiauniniuose paprasto judesio trupintuvuose yra *darbinė ir tuščioji žiaunos eiga.*

Veleno ekscentrinei daliai kylant aukštyn, švaistiklis taip pat yra keliamas į viršų, skėtimo plokštė atsitraukia nuo judamosios žiaunos, kuri dėl savo sunkio jėgos bei spyruoklės *13* poveikio per trauklę *17* taip pat atsitraukia nuo nejudamosios žiaunos (*tuščioji judamosios žiaunos eiga*) ir neleidžia skėtimo plokštėms iškristi iš babitinių lizdų. Tuo metu pakankamai susmulkintos medžiagos dalis iškrinta iš trupintuvo. Varantysis trupintuvo velenas turi būti atsparus dilimui ir dinaminėms apkrovoms, todėl jis gaminamas iš chromu ir nikeliu, chromu ir molibdenu arba vanadžiu legiruoto plieno. Paprasto judesio žiauniniuose trupintuvuose medžiaga smulkinama tik darbinės eigos metu ir tik tuo metu labiausiai apkraunami velenai, trupinimo plokštės, guoliai ir kitos detalės. Trupintuvo darbo netolygumui sumažinti ant varančiojo veleno galų sumontuojami smagračiai, kurių vienas per diržinę pavarą ir suka varantįjį veleną. Smagračiai su varančiuoju velenu sujungiami daugiadiskėmis frikcinėmis sankabomis, prispaudžiamomis spyruoklėmis, kad prireikus, neišjungiant variklio ir diržinės pavaros, galima būtų švelniai, be smūgių išjungti arba

įjungti varantįjį veleną, sujungtą per švaistiklinį mechanizmą su judamąja žiauna. Judamajai žiaunai judesio momentą perduodančios skėtimo plokštės *16* daromos su *susilpnintais sujungimais*, kad, atsitiktinai patekus į trupintuvą per stambiam metaliniam pašaliniam daiktui (pvz., stambiam plaktukui ar kitam įrankiui), pirmiausiai būtų nukerpami kniedytieji sujungimai ir, judamajai žiaunai laisvai pakankamai atsitraukus, nebūtų sugadintos svarbesnės ir sunkiau pakeičiamos detalės.

Iškrovimo angos plotis, o kartu ir susmulkintos medžiagos gabaliukų dydis, keičiamas sraigtu *10* ir pleištinėmis plokštėmis *12* ir *15*. Keliant sraigtu *10* pleištinę plokštę *12*, kita pleištinė plokštė *15*, kuri gali judėti tik horizontalia kryptimi, per skėtimo plokštes pristumia judamąją žiauną arčiau nejudamosios taip susiaurindama iškrovimo angą. Iškrovimo angos plotis taip pat gali būti reguliuojamas įdedant reikiamo storio tarpiklį tarp stovo *11* sienelės ir pleištinės plokštės *12*.

Žiauniniuose paprasto judesio trupintuvuose su viršuje įtvirtintu judamosios žiaunos ašies velenu gaunamo produkto gabaliukai būna netolygaus dydžio, tačiau pagal sverto taisyklę (11.5 pav., *a*) didžiausios smulkinimo apkrovos susidaro viršutinėje trupintuvo dalyje, į kurią patenka didžiausi gabalai, o ekscentrinį veleną veikia mažesnės apkrovos negu kitų konstrukcijų trupintuvuose:

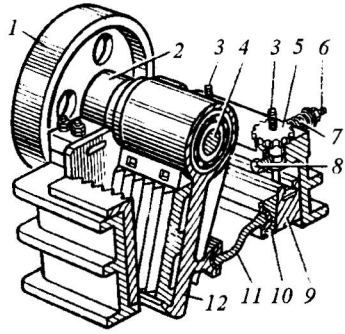
$$Q_{max} = T \cdot l_1 / a_1 . \qquad (11.29)$$

Taigi $T < Q_{max}$ ir tai palengvina trupintuvo konstrukcinių detalių darbą.

Žiauninių trupintuvų su sudėtingo judesio žiauna (11.7 pav.) judamosios žiaunos *12* ašinio veleno nėra, o žiaunos viršutinė dalis su radialiniais rutuliniais guoliais yra užmauta ant varančiojo veleno ekscentrinės dalies *4*.

Šio tipo trupintuvuose yra tik viena skėtimo plokštė *11*, įstatyta į babitinį prilaikymo lizdą pleištinėje plokštėje *10*. Be to, nėra švaistiklinio mechanizmo, todėl labai (beveik du kartus) sumažėja trupintuvo masė, metalo sąnaudos, esant tokiam pat našumui. Kaip ir pirmojo tipo trupintuvuose, sraigtu *5* ir pleištinėmis plokštėmis *9* ir *10* reguliuojamas mažiausias tarpas tarp nejudamosios ir judamosios žiaunų. Judamosios žiaunos atsitraukimo metu skėtimo plokštė prilaikoma traukle *6* ir spyruokle *7*. Esant tokiam judamosios žiaunos įtvirtinimui, jos viršutinės dalies taškai brėžia apskritimą, o apatinės dalies – lanką, kurio spindulys lygus skėtimo plokštės ilgiui, todėl suminė judamosios žiaunos darbinio paviršiaus taškų judesio trajektorija būna sudėtinga (vidurinėje dalyje artima elipsei). Tuo metu, kai viršutinė žiaunos dalis juda link nejudamosios, smulkindama stambius gabalus, jos apatinė dalis atsitraukia ir susmulkinti gabaliukai krinta iš trupintuvo. Kai viršutinė dalis atsitraukia nuo nejudamosios žiaunos, žemesnė dalis papildomai smulkina medžiagą, todėl sudėtingo judesio žiauniniuose trupintuvuose tuščiosios eigos nėra, trupintuvo darbas yra tolygesnis, o našumas – didesnis. Dėl judamosios žiaunos judesio ir

vertikalia kryptimi sutrupintą medžiagą lengviau iškrauti, žiaunų darbiniai paviršiai pritrina daugiau smulkiosios frakcijos, tačiau ji greičiau dėvisi.



11.7 pav. Žiauninio trupintuvo su sudėtingo judesio žiauna konstrukcinė schema: 1 – varantysis skriemulys, 2 – skriemulio guoliai, 3 – vertikaliai kilnojamos pleištinės plokštės įsriegti strypai, 4 – judamosios plokštės veleno ekscentrinė dalis, įtvirtinta guoliuose, 5 – judamosios žiaunos eigos reguliavimo sraigtas, 6 – trauklė, 7 – spyruoklė, 8 – tepimo anga, 9 – vertikaliai kilnojama pleištinė plokštė, 10 – horizontaliai judanti eigos reguliavimo plokštė, 11 – skėtimo plokštė, 12 – judamoji žiauna

Esminis šio tipo trupintuvų trūkumas tas, kad trupinimo reakcijos jėga perduodama tiesiogiai varančiojo veleno ekscentrinei daliai. Dėl to sunku sukurti labai našius trupintuvus, skirtus didelių gabalų pirminiam stambiajam trupinimui. Didžiausiais sudėtingo judesio trupintuvais galima trupinti tik iki 0,5 m dydžio vidutinio stiprumo medžiagos gabalus, o didžiausiais paprasto judesio trupintuvais – 1,1 m ir net didesnius gabalus. Didžiausi trupintuvų našumai atitinkamai yra 200 ir 550 m^3/h.

Kitos anksčiau (11.5 pav.), pateiktos žiauninių trupintuvų veikimo schemos, sukurtos siekiant visiškai išvengti tuščiosios eigos, suintensyvinti trupinimo procesą bei užtikrinti tolygesnį trupintuvo darbą, praktikoje nepasiteisino dėl konstrukcijų sudėtingumo ir nepatikimumo.

Žiauninių trupintuvų skaičiavimai. Pasirinkus medžiagai trupinti žiauninį trupintuvą, nustatomi tokie jo svarbiausi rodikliai: griebimo kampas α, optimalus varančiojo veleno sukimosi kampinis greitis ir dažnis, trupintuvo našumas ir reikalinga elektros variklio galia.

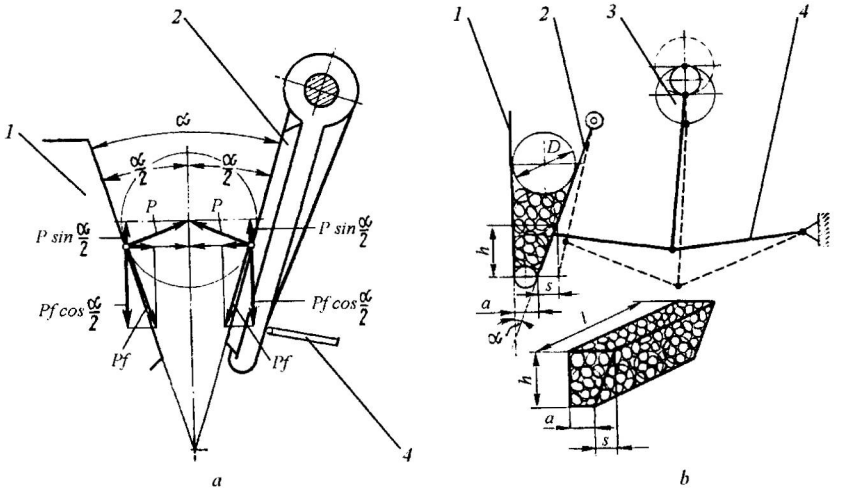
Griebimo kampas α – tai didžiausias kampas, kuris susidaro tarp nejudamosios ir judamosios žiaunų trupintuvo darbo metu. Jei šis kampas bus per didelis, judamajai žiaunai artėjant prie nejudamosios trupinamos medžiagos gabalai bus stumiami į viršų ir nebus gniuždomi. Jei jis bus per mažas, tai smulkinimo laipsnis bus nedidelis ir reikės labai aukštų žiaunų. Optimaliam

griebimo kampui nustatyti tariame, kad abi žiaunos pasvirusios vienodu kampu ir kad trupinamos medžiagos gabalas yra rutulio formos (11.8 pav., *a*).

Veikiant judamosios žiaunos gniuždomąjai jėgai P, gabaliuko lietimosi su žiaunomis taškuose susidaro trinties jėgos $T = Pf$. Trupinamas gabalas nebus išstumiamas iš trupintuvo, jeigu jį išstumianti suminė jėga $2 \cdot P \cdot \sin \alpha/2$ nebus didesnė už suminę trinties jėgos dedamąją, t. y. kai

$$2 \cdot P \cdot \sin\alpha/2 \le 2 \cdot P \cdot f \cdot \cos\alpha/2 .$$

Padalijus abi šios nelygybės puses iš $2 \cdot P \cdot \cos \alpha/2$, gaunama: $tg\,\alpha/2 \le f$.



11.8 pav. Žiauninio trupintuvo griebimo kampo (*a*) ir varančiojo veleno sukimosi dažnio bei trupintuvo našumo (*b*) nustatymo schemos: α – griebimo kampas, *1* – nejudamoji žiauna, *2* – judamoji žiauna, *3* – ekscentrinis velenas, *4* – skėtimo plokštės

Trinties koeficientą f galima išreikšti trinties kampu φ ($f = tg\varphi$). Tada

$$\alpha \le 2 \cdot \varphi . \qquad (11.30)$$

Kai su plienu liečiasi sausos medžiagos, $f = 0{,}3$, $\varphi = 16°40'$. Praktikoje $\alpha = 15...25°$, o teoriniuose skaičiavimuose laikoma, kad, trupinant sausas medžiagas, optimali α vertė $\alpha = 19°$. Optimalios griebimo kampo α vertės žiauniniuose trupintuvuose susidaro, kai jų krovimo angos plotis 2...2,5 karto mažesnis už nejudamosios žiaunos aukštį. Esant šiam parametrų santykiui, $i = 3...6$.

Varančiojo veleno optimalaus sukimosi kampinio greičio ir dažnio nustatymas. Mažiausią iškrovimo angos plotį, kai judamoji žiauna yra arčiausiai nejudamosios, pažymėkime simboliu a (11.8 pav., *b*).

Jei tarsim, kad ekscentriniam velenui pasisukus 180° kampu, t. y. pusę viso apsisukimo, judamosios žiaunos apatinis taškas atsitraukia nuo šios padėties didžiausiu atstumu s (žiaunos eiga), tai iš trupintuvo iškrovimo angos sunkio jėgos veikiamas gali iškristi trapecinės prizmės pavidalo susmulkintos medžiagos sluoksnis.

Kad sutrupinti gabaliukai būtų tolygesnio dydžio, žiauninių trupintuvų judamosios žiaunos eiga daroma labai maža – nuo 0,005 iki 0,03 m (didesnių trupintuvų – didesnė), todėl, judant žiaunai, griebimo kampas keičiasi labai mažai ir galime tarti, kad jis išlieka toks pat ir atsitraukus judamajai žiaunai į kraštinę padėtį. Priėmus šiuos teiginius, galima nustatyti reikalingą ekscentrinio veleno sukimosi greitį ω, kad sutrupintos medžiagos prizmė galėtų netrukdomai iškristi iš trupintuvo. Pagal laisvojo kritimo dėsnį

$$h = g \cdot \tau_1^2 / 2 . \qquad (11.31)$$

Iš čia medžiagos trapecijos kritimo trukmė

$$\tau_1 = \sqrt{2h/g} . \qquad (11.32)$$

Iš kitos sąlygos, sukantis ekscentriniam velenui kampiniu greičiu ω, vieno žiaunos atsitraukimo trukmė

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi}{\omega} . \qquad (11.33)$$

Sutrupintos medžiagos prizmė galės netrukdomai iškristi iš trupintuvo, jei bus įvykdyta sąlyga, kad $\tau_1 = \tau_2$:

$$\sqrt{2h/g} = \pi / \omega .$$

Taigi ekscentrinio veleno kampinis sukimosi greitis turi būti

$$\omega = (\pi\sqrt{g})/\sqrt{2h} . \qquad (11.34)$$

Medžiagos prizmės aukštis h gali būti apskaičiuojamas iš stačiojo trikampio kraštinių s ir h (11.8 pav., *b*) santykio:

$$tg\alpha = s/h, \quad h = s/tg\alpha . \qquad (11.35)$$

Įrašę šią h vertę bei π ir g skaitines vertes į (11.34) lygtį, gauname:

$$\omega = 6{,}95 \cdot \sqrt{tg\alpha / s} . \qquad (11.36)$$

Esant optimaliam griebimo kampui $\alpha = 19°$, $tg\alpha = 0{,}3443$ ir tada reikalingas optimalus ekscentrinio veleno sukimosi greitis ω_{opt}, rad/s, gali būti apskaičiuojamas, žinant eigos s dydį:

$$\omega_{opt} = 4{,}0 / \sqrt{s} . \qquad (11.37)$$

Pramonėje ekscentrinio veleno sukimosi greitis dažnai nusakomas ne SI vienetais, bet sukimosi dažniu n ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$; $n = \omega/(2 \cdot \pi)$), aps./s. Tada

$$n_{opt} = 0{,}635 / \sqrt{s} . \qquad (11.38)$$

Šios lygtys neįvertina iškrintančios medžiagos stabdymo trintimi, todėl ω_{opt} ir n_{opt} rekomenduojama sumažinti 5...10 %. Be to, jei trupintuvai labai stambūs, didelių dinaminių apkrovų (1000...1400 jėgos tonų) neigiamam poveikiui sumažinti rekomenduojama šias vertes sumažinti dar labiau (25...40 %).

Žiauninio trupintuvo našumo skaičiavimai. Tarkime, kad trapecijos pavidalo susmulkintos medžiagos sluoksnis iškrinta tik judamosios žiaunos atsitraukimo metu ir kad per vieną ekscentrinio veleno apsisukimą medžiaga iškrinta visa. Iškrintančios trapecijos tūris (11.8 pav., *b*) apskaičiuojamas taip:

$$V = F \cdot L = h \cdot L \cdot (2 \cdot a + s)/2 = [(2 \cdot a + s)/2] \cdot (s/tg\alpha) \cdot L ; \qquad (11.39)$$

čia L – iškrovimo angos ilgis, m.

Tuomet trupintuvo našumas G_V, m^3/s,

$$G_V = V \cdot n \cdot k_t , \qquad (11.40)$$

arba našumas pagal medžiagos masę G_m, kg/s,

$$G_m = V \cdot n \cdot k_t \cdot \rho ; \qquad (11.41)$$

čia n – optimalus darbinis ekscentrinio veleno sukimosi dažnis, aps./s; ρ – trupinamos medžiagos tankis, kg/m^3; k_t – trupinamos medžiagos poringumo koeficientas, įvertinantis tuštumas, susidarančias trupintuve tarp pakraunamos medžiagos gabalų, $k_t = 0{,}25...0{,}70$ (mažesnės vertės – stambiems trupintuvams, didesnės – mažiems).

Jei tarsime, kad iš trupintuvo iškrinta mažiausi $d_{min} = a$ ir didžiausi $d_{max} = a + s$ gabaliukai, tai vidutinis iškrintančių gabaliukų skersmuo

$$d_m = (a + (a + s))/2 = (2a + s)/2 . \qquad (11.42)$$

Pakeitę (11.39) lygtyje vertę $(2s + s)/2$ į d_m ir įrašę į (11.40) ir (11.41) lygtis $tg\alpha$ ir n vertes, esant optimaliai griebimo kampo α vertei ($\alpha = 19°$), gauname šias išraiškas žiauninio trupintuvo našumui apskaičiuoti:

$$G_V = 1{,}85 \cdot d_m L \cdot k_t \cdot \sqrt{s}\,, \tag{11.43}$$

$$G_m = 1{,}85 \cdot d_m L \cdot k_t \cdot \rho \cdot \sqrt{s}\,. \tag{11.44}$$

Žiauninio trupintuvo elektros variklio reikalingos galios skaičiavimai. Analitiškai tiksliai apskaičiuoti reikalingos galios vertes dėl didelio skaičiaus kintančių rodiklių trupinimo metu yra sudėtinga, todėl skaičiavimais galime nustatyti tik apytiksles, orientacines elektros variklio reikalingos galios vertes. Trupinant vidutinio stiprumo medžiagas, galima naudotis (11.23) ir (11.27) lygtimis arba patikslinta L. Levensono lygtimi:

$$N = \frac{k_R \cdot k_n \cdot \sigma_{gn}^2 \cdot \pi \cdot L \cdot n}{12 \cdot E \cdot \eta} \cdot (D_m^2 - d_m^2)\,; \tag{11.45}$$

čia N – reikalinga elektros variklio galia, W; k_R – koeficientas, įvertinantis trupinamos medžiagos stiprumo mažėjimą, didėjant pradinių gabalų dydžiui (vidutinio dydžio trupintuvui, kai $b = 0{,}4$ m ir $l = 0{,}6$ m, $k_R = 1{,}0$; dideliam trupintuvui (1,5 × 2,1) m $k_R = 0{,}555$); k_n – koeficientas, įvertinantis tai, kad dažnai trupintuvo krovimo angos ilgis nevisiškai užpildomas pradiniais gabalais (pvz., jei $l = 600$ mm, $D_m = 175$ mm, $L/D = 600/175 = 3{,}43$, tačiau trupintuvo krovimo angos ilgyje gali tilpti tik trys pradiniai gabalai, todėl $k_n = 3/3{,}43 = 0{,}876$); η – trupintuvo naudingumo koeficientas, kurio vertės paprasto žiaunos judesio trupintuvams su viršuje įtvirtinta žiauna būna 0,32...0,35, o sudėtingo žiaunos judesio trupintuvams labai priklauso nuo jų dydžio ir smarkiai svyruoja – nuo 0,02 labai mažiems iki 0,38 – didžiausiems; σ_{gn} – trupinamos medžiagos stipris gniuždant, Pa; E – trupinamos medžiagos tamprumo modulis, Pa.

Paprasto žiaunos judesio trupintuvams gali būti naudojama nesudėtinga empirinė lygtis:

$$N = c \cdot A \cdot B\,; \tag{11.46}$$

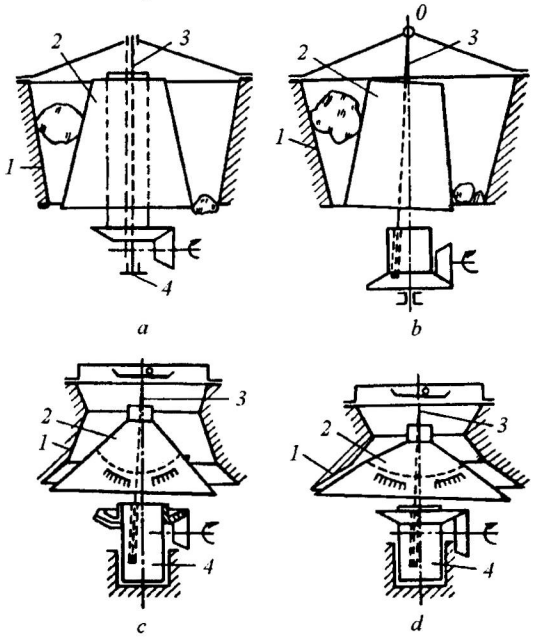
čia N – reikalinga elektros variklio galia, kW; A ir B – trupintuvo krovimo angos plotis ir ilgis, cm; c – koeficientas, kurio vertės priklauso nuo trupintuvo dydžio (kai trupintuvų krovimo angos mažesnės kaip (0,25×0,4) m, $c = 1/60$; kai krovimo angos yra nuo (0,25×0,4) m iki (0,9×1,2) m, $c = 1/100$, o kai krovimo angos didesnės kaip (0,9×1,2) m, $c = 1/120$).

Apytikriai apskaičiuojant trupintuvui reikalingą elektros variklio galią, tariama, kad, esant susmulkinimo laipsniui $i = 4$, kiekvienam trupintuvo našumo vienetui 0,28 kg/s (1 t/h) reikalinga: smulkinant silpnas, minkštas medžiagas, 0,4...0,5 kW; smulkinant vidutinio stiprumo medžiagas, 0,75...0,92 kW, o smulkinant stiprias medžiagas, 0,9...1,1 kW galia. Didėjant smulkinimo laipsniui i, reikalinga elektros variklio galia didėja.

11.1.6.2. Kūginiai trupintuvai

Kūginiai trupintuvai naudojami sausoms stiprioms arba vidutinio stiprumo medžiagoms rupiai, vidutiniškai arba smulkiai trupinti. Pagrindinių tipų kūginių trupintuvų principinės schemos pateiktos 11.9 pav. Per krumpliaračių sistemą *4* sukamo vidinio kūgio ašis erdvėje nubrėžia cilindrą (11.9 pav., *a*) arba smailųjį kūgį (11.9 pav., *b, c, d*).

Kūginiuose trupintuvuose medžiagos gabalai yra ne tik gniuždomi, bet ir lenkiami vidinio judamojo kūgio darbiniam paviršiui artėjant prie išorinio nejudamai įtvirtinto kūgio paviršiaus. Medžiagų stipris lenkiant yra 10...15 kartų mažesnis už jų stiprį gniuždant, todėl kūginiuose trupintuvuose medžiaga smulkinama efektyviau, esant mažesnėms savitosioms energijos sąnaudoms negu žiauniniuose trupintuvuose.



11.9 pav. Pagrindinės kūginių trupintuvų schemos:
a ir *b* – rupiojo trupinimo, *c* – vidutinio trupinimo, *d* – smulkiojo trupinimo;
1 – išorinis kūgis, *2* – vidinis judamasis kūgis, *3* – išorinio kūgio ašinė linija,
4 – krumpliaratinis sukamojo judesio perdavimo mechanizmas

Kūginių trupintuvų vidiniam kūgiui sukantis apie savo ašį smulkinimo zona tolygiai slenka apskritimu pagal išorinio kūgio vidinę sienelę, todėl juose trupinimo ir iškrovimo procesas vyksta nuolat, tuo pačiu metu. Dėl to kūginiai

trupintuvai yra gerokai našesni (apie du kartus) už žiauninius trupintuvus. Kūginiai trupintuvai neturi masyvaus smagračio, todėl jiems mažiau reikia metalo ir įrenginio masės vienetui tenka daug didesnis susmulkintos medžiagos kiekis. Kūginiai trupintuvai dirba tolygiau, nesusidaro didelių dinaminių apkrovų, įjungti trupintuvą galima net su pripildyta smulkinimo kamera, patogiau tiekti trupinamąją medžiagą, sutrupinti gabaliukai būna vienodesnio dydžio.

Tačiau, palyginti su žiauniniais, kūginius trupintuvus sudėtingiau ir brangiau remontuoti bei eksploatuoti, jie netinka drėgnoms medžiagoms trupinti.

Nors kūginiai trupintuvai turi nemaža pranašumų palyginti su žiauniniais, renkantis trupintuvo tipą, būtina atlikti visos smulkinimo schemos ekonominę analizę ir racionaliai įvertinti smulkinimo faktorių visumą. Pvz., kai pradinės smulkinamos medžiagos gabalai dideli, o didelio našumo nereikia, vietoj kūginių geriau rinktis žiauninius trupintuvus, nes didelių, labai našių kūginių trupintuvų išnaudojimo laipsnis bus per mažas.

Pagal technologinę paskirtį skiriami:

1) *rupiojo trupinimo* kūginiai trupintuvai (didžiausias pakraunamų gabalų dydis 300...1500 mm, smulkinimo laipsnis i = 5...7);
2) *vidutinio trupinimo* kūginiai trupintuvai (didžiausias pakraunamų gabalų dydis 75...350 mm, i = 8...10);
3) *smulkiojo trupinimo* kūginiai trupintuvai (didžiausias pakraunamų gabalų dydis 30...75 mm, i = 10...20).

Pagal konstrukciją kūginiai trupintuvai skirstomi į:

1) trupintuvus su aukštu vidiniu kūgiu, kurio ašis, sukantis kūgiui, brėžia cilindrą (11.9 pav., *a*);
2) trupintuvus su aukštu vidiniu kūgiu, kurio ašis, sukantis kūgiui, brėžia smailųjį kūgį (11.9 pav., *b*);
3) trupintuvus su žemu ir lėkštu vidiniu kūgiu, kurio ašis, sukantis kūgiui, brėžia smailą kūgį (11.9 pav., *c* ir *d*).

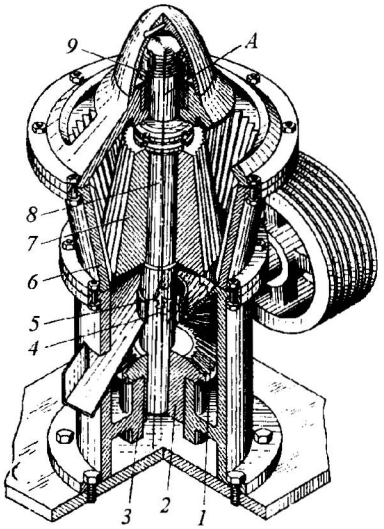
Kūginio trupintuvo su aukštu vidiniu kūgiu konstrukcinė schema parodyta 11.10 pav. Diržine pavara per skriemulį sukant krumpliaračių porą *1*, ekscentriškai sukamas vidinio kūgio velenas *8* su prie jo pritvirtintu vidiniu kūgiu *7*. Veleno viršutinis galas prilaikomas guoliuose *9*, o apatinis įstatytas į guoliuose *3* krumpliaračio *1* sukamos įvorės *2* ekscentriškai ištekintą skylę.

Apatinė trupintuvo stovo dalis varžtais pritvirtinta prie pagrindo, o prie stovo viršutinės dalies įkaitintais varžtais pritvirtintas išorinis kūgis *6*.

Kūginiai trupintuvai su aukštu vidiniu kūgiu (11.9 pav., *a* ir *b*) naudojami rupiajam trupinimui, o su žemu ir lėkštu vidiniu kūgiu – vidutiniam (*c*) ir smulkiam (*d*) trupinimui.

Smulkinimo skėlimu efektyvumui padidinti darbiniai išorinio ir vidinio kūgio paviršiai daromi briaunoti, vidinio kūgio kampas prie apatinio pagrindo būna 70...80°. Didelių trupintuvų vidinis trupinimo kūgis išklojamas dviem

žiedais: viršutinis, mažiau išsidėvintis, gaminamas ir chromu legiruoto plieno arba baltojo ketaus, apatinis, labiau išsidėvintis, – iš manganu (12...14 %) legiruoto plieno. Tarpas tarp žiedų ir kūgio korpuso užliejamas išlydytu cinku. Vidutinio našumo trupintuvų stovas išliejamas iš vienos masyvios dalies, kuri viršuje baigiasi žiedu, į kurį įsukamas išorinis kūgis.



11.10 pav. Kūginis trupintuvas su aukštu vidiniu kūgiu

Vidutinio ir smulkiojo trupinimo kūginiai trupintuvai su lėkštu vidiniu kūgiu skiriasi nuo rupiojo trupinimo trupintuvų tuo, kad vidinis kūgis yra daug trumpesnis ir lėkštesnis (kampas prie pagrindo 40...42°), be to, išorinis kūgis taip pat daromas platėjantis į apačią, kad trupintuvo apatinėje dalyje susidarytų vadinamoji lygiagretumo zona, užtikrinanti tolygesnius sutrupintų gabaliukų dydžius. Šių trupintuvų išorinis kūgis dažniausiai su stovu sujungiamas per spyruokles arba pneumatinius amortizatorius, kad, į lygiagretumo zoną patekus atsitiktiniam metaliniam daiktui, galėtų atsitraukti ir nesuirtų trupintuvo darbiniai paviršiai ir svarbios detalės.

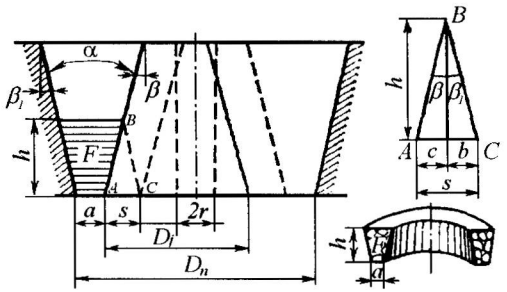
Kūginių trupintuvų skaičiavimai. Kūginių trupintuvų su aukštu kūgiu ir su lėkštu kūgiu skaičiavimų principai yra skirtingi.

Kaip ir žiauninių trupintuvų, abiejų tipų kūginių trupintuvų griebimo kampas α turi būti mažesnis už dvigubą trinties kampą φ:

$$\beta + \beta_1 = \alpha \leq 2 \cdot \varphi . \qquad (11.47)$$

a) *Kūginių trupintuvų su aukštu kūgiu našumas.* Tarkime, kad abiejų tipų (11.9 pav., *a* ir *b*) kūginių trupintuvų vidinio kūgio ašis yra lygiagreti su išorinio kūgio ašimi. Paklaida *b* atveju yra nedidelė, nes kampas tarp šių ašių paprastai neviršija 2...3°. Vidiniam kūgiui apsisukus vieną kartą, iš trupintuvo iškrinta žiedo pavidalo sutrupintos medžiagos juosta, kurios skerspjūvis *F* yra trapecijos formos (11.11 pav.):

$$F = (a + s + a) \cdot h/2 = (2a + s) \cdot h/2 . \qquad (11.48)$$



11.11 pav. Kūginio trupintuvo našumo skaičiavimo schema

Kadangi vidutinis žiedo skersmuo yra artimas išorinio kūgio apatiniam skersmeniui D_n, tai žiedo tūris

$$V = \pi \cdot D_n \cdot (2a + s) \cdot h/2 . \qquad (11.49)$$

Žiedo aukštį *h* galima nustatyti iš trikampio *ABC*, padalijus jį į du stačiuosius trikampius:

$$c = h \cdot tg\beta \text{ ir } b = h \cdot tg\beta_1 ,\ c + b = s = 2 \cdot r = h \cdot (tg\beta + tg\beta_1),$$

$$h = 2 \cdot r/(tg\beta + tg\beta); \qquad (11.50)$$

čia *r* – vidinio kūgio veleno ašies ekscentriškumas, m.

Įrašę *h* išraišką iš (11.50) lygties į sutrupintos medžiagos žiedo tūrio lygtį (11.49), gauname:

$$V = \pi \cdot D_n \cdot \frac{2a + s}{2} \cdot \frac{2r}{tg\beta + tg\beta_1} . \qquad (11.51)$$

Šioje lygtyje vietoj *s* galime įrašyti $s = 2r$. Tuomet:

$$V = \frac{\pi \cdot D_n \cdot (a + r) 2r}{tg\beta + tg\beta_1} . \qquad (11.52)$$

Jei vidinis kūgis sukasi dažniu n, aps./s, tai, tuštumų tūrį tarp trupinamos medžiagos gabalų įvertinus koeficientu k_t, trupintuvo našumą G_v, m^3/s, galima apskaičiuoti taip:

$$G_v = V \cdot n \cdot k_t = \frac{2 \cdot \pi \cdot D_n \cdot (a + r) \cdot r \cdot n \cdot k_t}{tg\beta + tg\beta_1}. \qquad (11.53)$$

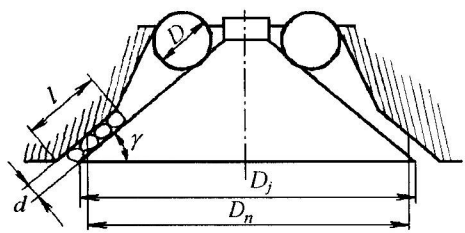
Iš trupintuvo techninių charakteristikų nesunkiai nustatomos D_n, a, r, β, β_1 skaitinės vertės. Vidinio kūgio sukimosi dažnis n, s^{-1}, kaip ir žiauninių trupintuvų, nustatomas iš laisvojo kūnų kritimo dėsnio ir gali būti išreiškiamas rodikliais r, β, β_1:

$$n = 0{,}706...0{,}745 \cdot \sqrt{\frac{tg\beta + tg\beta_1}{r}}. \qquad (11.54)$$

Trupintuvo našumas masės vienetais G_m, kg/s, apskaičiuojamas, žinant sutrupintos medžiagos piltinį tankį ρ_p, kg/m^3:

$$G_m = G_V \cdot \rho_P. \qquad (11.55)$$

b) Vidutinio ir smulkiojo trupinimo kūginių trupintuvų su lėkštu kūgiu našumas apskaičiuojamas iš sąlygos, kad sutrupintos medžiagos gabaliukas turi pereiti lygiagrečiosios zonos ilgį l (11.12 pav.), kol vidinis kūgis apsisuka vieną kartą.



11.12 pav. Kūginio trupintuvo su lėkštu kūgiu skaičiavimo schema

Rekomenduojamas lygiagrečiosios zonos ilgis $l = 0{,}08 \cdot D_j$, kūgio sukimosi dažnis n, s^{-1},

$$n = 7{,}8 \cdot \sqrt{\frac{\sin\gamma - f\cos\gamma}{D_j}}; \qquad (11.56)$$

čia γ – vidinio trupinimo kūgio pagrindo kampas; f – sausos trupinamos medžiagos trinties į plieną koeficientas ($f = 0{,}35$); D_j – vidinio kūgio apatinio pagrindo skersmuo, m.

Tuomet trupintuvo tūrinis našumas G_V, m^3/s, apskaičiuojamas pagal lygtį

$$G_V = V \cdot n \cdot k_t = \pi \cdot d \cdot l \cdot D_i \cdot n \cdot k_t = \pi \cdot d \cdot 0{,}08 \cdot D_j^2 \cdot n \cdot k_t \,, \quad (11.57)$$

o trupintuvo našumas masės vienetais G_m, kg/s,

$$G_m = G_V \cdot \rho_P \,; \quad (11.58)$$

čia k_t – koeficientas, įvertinantis tuštumas tarp trupinti tiekiamos medžiagos gabalų ($k_t = 0{,}25...0{,}6$).

Dideliems kūginiams trupintuvams reikalinga elektros variklio galia N_v, kW, apytiksliai gali būti apskaičiuojama pagal empirinę lygtį:

$$N_v = 85 \cdot D_n^2 \,; \quad (11.59)$$

čia D_n – išorinio kūgio skersmuo lygiagretumo zonoje, m.

Vidutinio ir smulkiojo trupinimo kūginiams trupintuvams su lėkštu vidiniu kūgiu reikalingo elektros variklio galia N_v, kW, apytiksliai apskaičiuojama taip:

$$N_v = 50 \cdot D_j^2 \,; \quad (11.60)$$

čia D_j – vidinio kūgio pagrindo skersmuo, m.

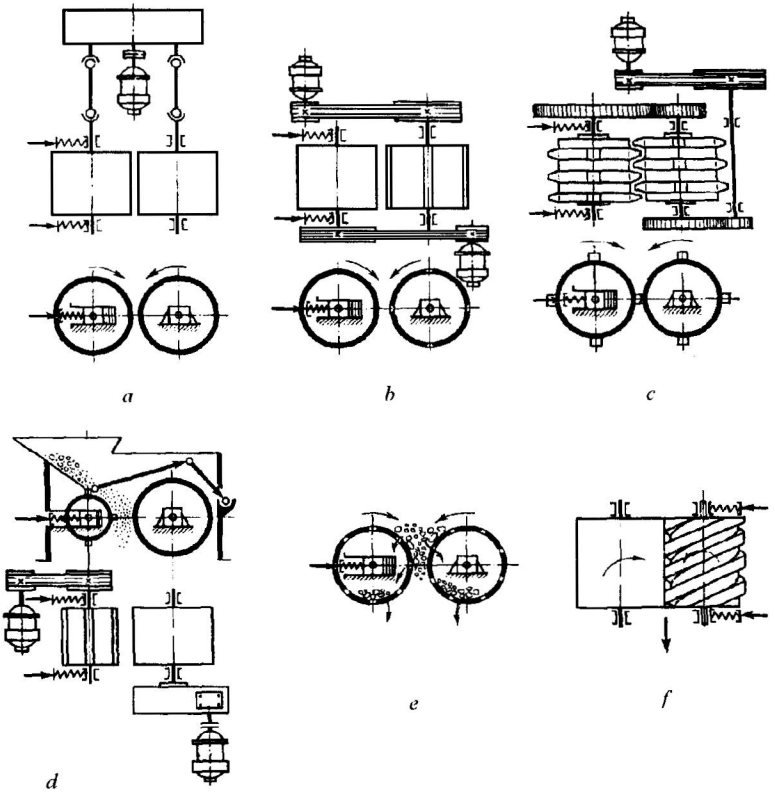
Tiksliau reikalingo elektros variklio galia gali būti apskaičiuojama iš patikslintos L. Levensono (11.19) lygties.

11.1.6.3. Valciniai trupintuvai

Valciniais trupintuvais (11.13 pav.) medžiaga smulkinama, traukiant ją į mažėjantį tarpą tarp dviejų priešingomis kryptimis besisukančių volų. Volų darbiniai paviršiai gali būti glotnūs (11.13 pav., *a*); su išilginėmis briaunomis (11.13 pav., *b* ir *d*); dantyti (11.13 pav., *c*); skylėti (11.13 pav., *e*); su sraigtinėmis briaunomis (11.13 pav., *f*). Valciniai trupintuvai taip pat gali būti sudaryti iš vieno dantytojo volo ir apatinių rūšiuojamųjų ardelių arba atmušamosios trupinimo plokštės bei iš dviejų arba trijų volų porų, išdėstytų viena virš kitos viename aparate. Medžiaga valciniuose trupintuvuose daugiausia yra gniuždoma tarp sukamų volų, o trupintuvuose su dantytaisiais volais stambesni gabalai daužomi. Šiuose trupintuvuose medžiaga taip pat smulkinama trynimu ir lenkimu.

Kadangi iš valcinių trupintuvų medžiaga iškrinta ne tik veikiama sunkio jėgos, bet ir traukiama volų darbinių paviršių, tai valciniais trupintuvais galima smulkinti ne tik sausas vidutinio stiprumo arba silpnas, minkštas medžiagas, bet ir gana drėgnas, plastiškas arba sausas medžiagas su plastiškais priedais, nes trupintuvai neužsikemša. Tai viena iš valcinių trupintuvų teigiamy-

bių. Valciniai trupintuvai yra paprastos konstrukcijos, patikimi, palyginti mažos jų savitosios smulkinimo energijos sąnaudos. Didžiausi trūkumai: valciniais trupintuvais su lygaus paviršiaus volais galima smulkinti tik nedidelių matmenų medžiagos gabaliukus, nedidelis jų smulkinimo laipsnis ($i = 4...5$); nedidelis našumas; volų ir įrenginio vibracijos; būtina labai tolygiai tiekti smulkinamą medžiagą išilgai volo darbinio paviršiaus.



11.13 pav. Valcinių trupintuvų tipai pagal volų darbinį paviršių:
a – su glotniu paviršiumi, *b* ir *d* – su išilginėmis briaunomis, *c* – su dantytu paviršiumi, *e* – su skylėtu paviršiumi, *f* – su sraigtinėmis briaunomis

Valciniai trupintuvai kartais naudojami ne tik medžiagai smulkinti, bet ir kietiems intarpams iš jos šalinti (11.13 pav., *d* ir *f*) arba medžiagai granuliuoti (11.13 pav., *e*).

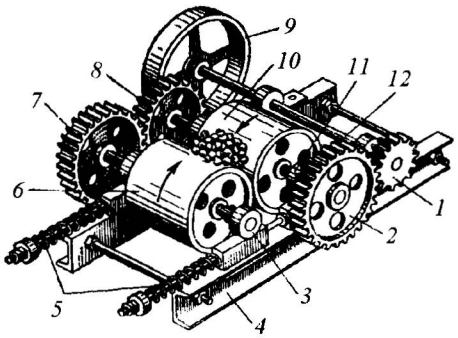
Valciniais trupintuvais, kurių vienas mažesnio skersmens ir gerokai greičiau sukamas volas turi nejudamai pritvirtintas išilgines briaunas, ne tik smul-

kinamos plastiškos medžiagos, bet ir šalinami iš jų smulkūs kieti intarpai, kurie išilginių briaunų smūgiu yra nusviedžiami į atmušamąsias plokštes, o nuo jų – į kietų intarpų šalinimo lataką (11.13 pav., *d*). Plastiškos medžiagos įtraukiamos į tarpą tarp priešingomis kryptimis besisukančių volų.

Stambūs kieti intarpai iš plastiškų medžiagų pašalinami valciniais trupintuvais, kurių vienas volas turi išilgines sraigtines briaunas (11.13 pav., *f*).

Valciniai trupintuvai su skylėtaisiais volais (11.13 pav., *e*) yra skirti ne tik plastiškoms medžiagoms smulkinti, bet ir jų granulėms ruošti. Šių trupintuvų volų lietuose būgnuose paliktos ertmės uždengiamos plieninio apvalkalo lakštais su ovalinėmis arba apvaliomis skylutėmis. Sukantis tokiems volams, iš pro šias skylutes į vidinę būgno ertmę išspaustos medžiagos susidaro reikiamo dydžio granulės.

Valcinio trupintuvo su lygiais volų paviršiais konstrukcinė schema pateikta 11.14 pav.



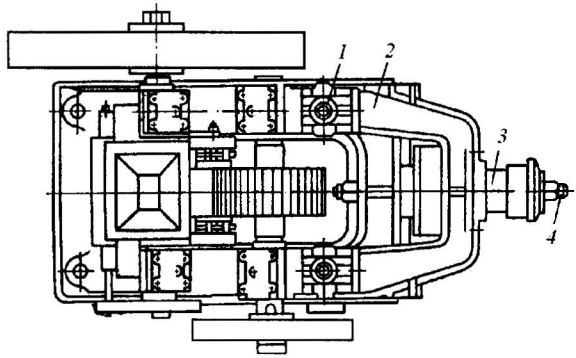
11.14 pav. Valcinis trupintuvas su lygaus paviršiaus volais: *1*, *2*, *7* ir *8* – krumpliaračiai, *3* ir *11* – volų velenų guoliai, *4* – stovas; *6* ir *10* – volai, *9* – diržinės pavaros skriemulys

Tam, kad tarp volų atsitiktinai patekus metaliniam intarpui nebūtų sugadinti darbiniai paviršiai, vieno arba abiejų volų veleno guoliai (11.14 pav., *3*) įtvirtinami per spyruokles paslankiai. Valcinių trupintuvų darbas būna tolygesnis, labiau subalansuotas, kai judamai įtvirtinami abu velenų guoliai, bet dėl paprastos konstrukcijos pramonėje dažniausiai naudojami trupintuvai su vienu judamai įtvirtintu volu. Tačiau šiuo atveju padidėja trupintuvo vibracijos, todėl reikalingas tvirtas, patikimas pamatas. Tokį trupintuvą galima įrengti tik pirmame cecho aukšte.

Krumpliaračiai *7* ir *8* turi aukštesnius krumplius, kad, volui *6* atsitraukus, jie išliktų susikabinę volui grįžtant į pradinę padėtį, nesulūžtų krumpliai. Ma-

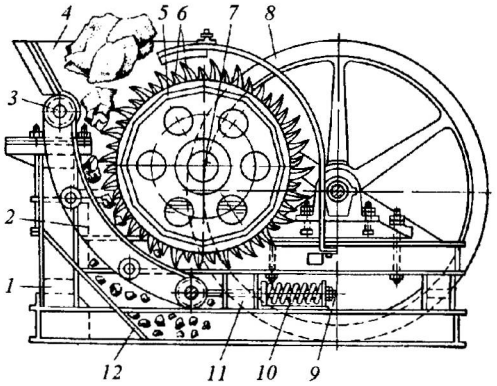
žiausias tarpas tarp volų reguliuojamas keičiamaisiais skirtingo storio tarpikliais, įdedamais į velenų guolių laikiklius prieš amortizacines spyruokles.

Kai amortizuojamas tik vienas volo velenas, dėl nevienodo atskirų spyruoklių tamprumo arba dėl netolygaus trupinamos medžiagos tiekimo išilgai volo, amortizuojamo volo velenas gali persikreipti. Tada produktas nebūna reikiamo smulkumo, pablogėja trupintuvo darbas. Šiam neigiamam reiškiniui išvengti naudojami valciniai trupintuvai su viena bendra amortizacine spyruokle *3*, per slankiojantįjį rėmą *2* perduodančia vienodą spaudimo jėgą į abu veleno guolius *1* (11.15 pav.).



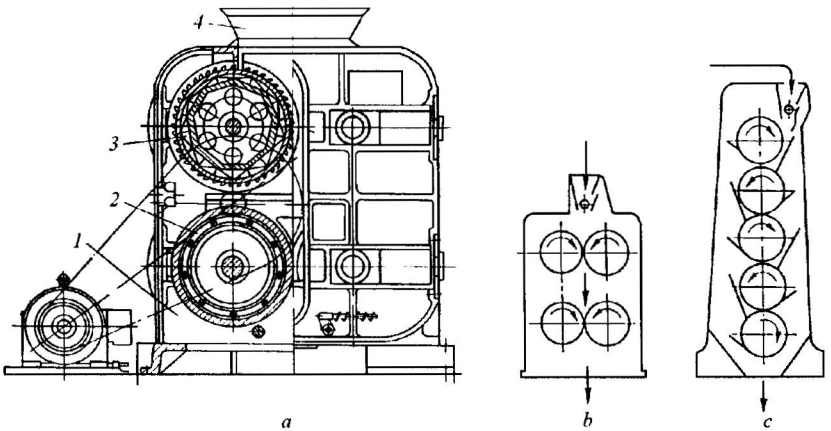
11.15 pav. Valcinis trupintuvas su lygiais volais ir bendra amortizacine spyruokle: *1* – judamai įtvirtinto veleno guolis, *2* – slankiojantysis rėmas, *3* – spyruoklė, *4* – spyruoklės trauklė

Vienas didžiausių valcinių trupintuvų su lygaus paviršiaus volais trūkumas yra tai, kad jais smulkinant į tarpą tarp volų gali būti įtraukiami tik nedideli pradinės medžiagos gabaliukai. Smulkinant sausas medžiagas, didžiausių gabaliukų skersmuo turi būti 20 kartų mažesnis už volo skersmenį. Didesnius pradinius gabalus galima trupinti, kai vieno volo apvalkale išfrezuojami *išilginiai pusapvaliai grioveliai* (11.13 pav., *b*). Didesni vidutinio ir mažo stiprio medžiagų gabalai efektyviau trupinami *dantytaisiais valciniais trupintuvais* (11.13 pav., *c*). Jų volų apvalkalas gali būti išliejamas ištisinis, su žemais ir plačiais dantimis arba surenkamas iš atskirų dantytų segmentų, žiedų. Pirmojo tipo dantytieji valciniai trupintuvai naudojami mažo stiprio, trapioms, neabrazyvioms medžiagoms (pvz., tokioms kaip anglys, koksas ir pan.) trupinti. Nudilus dantims, paprastai keičiamas visas volas. Antrojo tipo dantytųjų valcinių trupintuvų keičiami atskiri susidėvėję segmentai. Tais pačiais tikslais naudojami valciniai trupintuvai su vienu dantytuoju volu ir rūšiuojamaisiais ardeliais (11.16 pav.) arba trupinimo žiauna, kurie įtvirtinami per amortizacines spyruokles.



11.16 pav. Dantytasis valcinis trupintuvas su rūšiuojamaisiais ardeliais:
1 – stovas, *2* – rūšiuojamieji ardeliai, *3* – viršutinė ardelių ašis, *4* –krovimo anga, *5* – volo korpusas, *6* – skirtingo aukščio dantys, *7* – volo velenas, *8* – skriemulys, *9* – trauklė, *10* – spyruoklė, *11* – atrama, *12* – bunkerio latakas

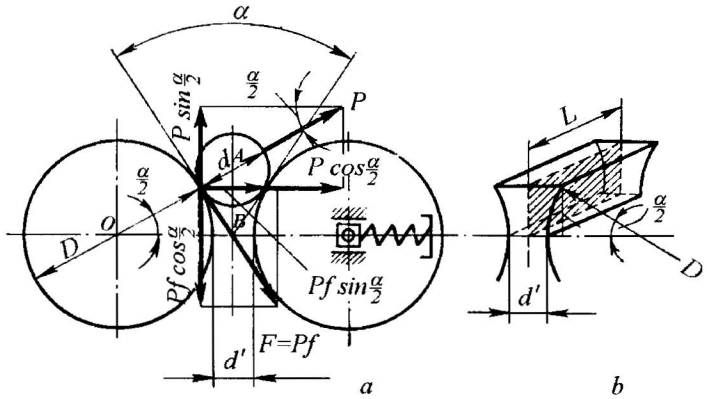
Tokių trupintuvų smulkinimo laipsnis būna 10...12 ir didesnis. Iš šių trupintuvų medžiaga iškrinta ne tik veikiama sunkio jėgos, bet ir stumiama dantytojo sukamojo volo. Galima smulkinti ir sausas uolienas su plastiškų medžiagų priedais arba ir gana drėgnas medžiagas, nes šie trupintuvai neužsikemša (kaip žiauniniai arba kūginiai).



11.17 pav. Dviejų porų valciniai trupintuvai (*a* ir *b*) ir daugiavolis valcinis trupintuvas su vertikaliai išdėstytais volais (*c*):
1 – stovas, *2* – apatinė volų pora, *3* – viršutinė volų pora, *4* – medžiagos tiekimo anga

Dideliu smulkinimo laipsniu ($i = 20$ ir didesniu) pasižymi taip pat valciniai trupintuvai, sudaryti iš dviejų arba net trijų volų porų, išdėstytų viena virš kitos viename aparate (11.17 pav.) Šiuose aparatuose apatinės volų poros turi suktis greičiau, todėl daugiau kaip trijų porų trupintuvai beveik nenaudojami. Valcinių trupintuvų lygių paviršių volai kartais daromi su paviršiniais mikronelygumais, kurie sudaromi abrazyvu šlifuojant volą arba apdorojant jo paviršių elektrokibirkštiniu būdu.

Valcinių trupintuvų skaičiavimai. Valcinių trupintuvų griebimo kampo α, volo ir tiekiamos trupinti medžiagos gabalo skersmenų santykio D/d bei našumo nustatymo schemos pateiktos 11.18 pav.



11.18 pav. Valcinio trupintuvo griebimo kampo α, santykio D/d ir našumo nustatymo schemos

Valcinių trupintuvų griebimo kampas α turi būti mažesnis už dvigubą trinties kampą φ:

$$2P \sin\alpha/2 \le 2P \cdot f \cdot \cos\alpha/2 \cdot 2P \cos\alpha/2,$$

$$tg\,\alpha/2 \le 2 \text{ arba } \alpha \le 2 \cdot \varphi.$$

Esant lygiam volų paviršiui, trupinant sausas medžiagas, $f = 0{,}3$, o trupinant drėgnas, plastiškas medžiagas, $f_2 = 0{,}45$; tada $\alpha_1 \le 32°$ ir $\alpha_2 \le 48°$.

Didžiausių į trupintuvą tiekiamų gabalų dydis d nustatomas iš 11.18 pav., *a*, schemos, jei tarsime, kad gabalai yra rutulio formos ir kad vidutinis trupintuvo susmulkinimo laipsnis $i = d/d' = 4$. Iš stačiojo trikampio OBA:

$$\cos\alpha/2 = \frac{OB}{OA} = \frac{D/2 + d'/2}{D/2 + d/2},$$

$$[0{,}5\cdot(D+d') = 0{,}5\cdot(D+d)\cdot\cos\alpha/2]\cdot 2/d.$$

$$D/d = \frac{\cos\alpha/2 - d'/d}{1-\cos\alpha/2}. \qquad (11.61)$$

Trupinant sausas medžiagas $\alpha_1 = 32°$, $i = d/d' = 4$, o santykis $d/d' = 1/4 = 0{,}25$. Įrašius šias vertes į (11.61) formulę, gaunama, kad $D/d \approx 17$. Kad trupintuvo darbas būtų patikimas, ši vertė turi būti 20...25 % didesnė, todėl, trupinant valciniais trupintuvais su lygaus paviršiaus volais sausas medžiagas, $D/d \approx 20$. Taigi valciniai trupintuvai su lygaus paviršiaus volais gali būti naudojami tik vidutiniam ir smulkiajam trupinimui, nes net ir esant dideliam volo skersmeniui (pvz., 1,5 m) į trupintuvą gali būti tiekiami tik nedidelių matmenų ($< 75\cdot10^{-3}$ m) sausos medžiagos gabaliukai.

Trupinant plastiškas drėgnas medžiagas, santykis D/d gali būti mažesnis ($D/d \approx 10...11$), o trupinant sausas medžiagas briaunotais bei dantytais valciniais trupintuvais, $D/d = 2...6$.

Valcinių trupintuvų tūrinis našumas G_v, m^3/s, (11.18 pav., *b*) apskaičiuojamas pagal lygtį

$$G_v = d\cdot L\cdot v\cdot k; \qquad (11.62)$$

čia d – sutrupintų gabaliukų skersmuo, m; v – medžiagos iškritimo iš trupintuvo greitis, apytiksliai imamas lygus linijiniam volo sukimosi greičiui, t. y. $v = \pi\cdot D\cdot n$; m/s; k – koeficientas, įvertinantis tuštumų tarp pakraunamų gabalų tūrį ir volo ilgio panaudojimo laipsnį (sausoms medžiagoms $k = 0{,}2...0{,}3$; drėgnoms, plastiškoms $k = 0{,}5...0{,}7$).

Jei trupinamos sausos, stiprios medžiagos, tai judamai įtvirtintas volas truputį atsitraukia, todėl šiais atvejais d vertę rekomenduojama padidinti 20...25 procentais.

Volų sukimosi dažnis n, s^{-1}, nustatomas iš empirinės L. Levensono formulės, atsižvelgiant į tai, kad darbinis volų sukimosi dažnis neturi viršyti tam tikros ribos, nes ją viršijus prasideda neleistinos volų vibracijos:

$$n_{max} \le 102{,}5\cdot\sqrt{f/\rho\cdot d\cdot D}, \qquad (11.63)$$

arba didžiausias kampinis volų sukimosi greitis ω, rad/s,

$$\omega_{max} \le 646\cdot\sqrt{f/\rho\cdot d\cdot D}; \qquad (11.64)$$

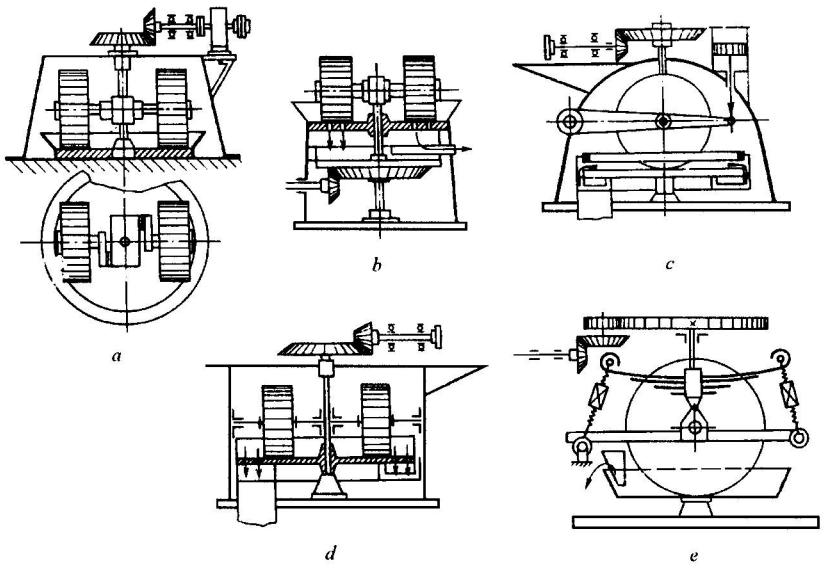
čia f – trupinamos medžiagos trinties į volą koeficientas; ρ – medžiagos vidutinis tankis, kg/m^3.

Kad volų apvalkalai mažiau išsidėvėtų, *darbiniai sukimosi dažniai* praktiškai būna daug mažesni: $n_d = (0,4...0,7) \cdot n_{max}$. Linijiniai volų sukimosi greičiai, trupinant sausas, kietas medžiagas, būna (1...2) m/s, o smulkinant plastiškas medžiagas, 6...7 m/s. Norint gauti vienodesnį produktą, greičiai mažinami.

Reikalinga elektros variklio galia apytiksliai nustatoma iš eksploatacinių duomenų, laikant, kad: a) trupintuvais su lygiais volais smulkinant sausas, stiprias medžiagas, 1 m^3/h našumo reikalinga 1,5...3,0 kW, o smulkinant plastiškas medžiagas arba silpnas, minkštas medžiagas (gipsą, kreidą, koksą), – 0,75...1,35 kW galia; b) smulkinant briaunotaisiais dezintegratoriniais trupintuvais, – 1,2...1,35 kW galia; c) smulkinant dantytaisiais vidutinio trupinimo trupintuvais, – 0,75...0,9 kW galia.

11.1.6.4. Bėgūnai

Bėgūnai (statgirnės) – tai smulkinimo įrenginiai, sudaryti iš masyvių ristuvų ir skylėtos arba ištisinės lėkštės. Medžiaga, patekusi tarp jų girnų ir lėkštės, smulkinama gniuždymu ir trynimu, ridenant girnas arba sukant lėkštę. Pagrindinių bėgūnų tipų schemos pateiktos 11.19 pav.



11.19 pav. Pagrindiniai bėgūnų tipai:
a – periodiniai, su nejudama lėkšte, *b* – nuolatiniai, su nejudama lėkšte,
c – su sukama lėkšte, kai susmulkinta medžiaga iškraunama pro lėkštės borto plyšelį,
d – su sukama lėkšte, kai medžiaga iškraunama per žiedo pavidalo sietą,
e – su sukama ištisine lėkšte, kai medžiaga iškraunama pro lataką

Kadangi smulkinimo procese tuo pačiu metu veikia gniuždymo ir tangentiniai įtempiai pagal medžiagoje susidarančius mikroplyšelius (dėl trinties ir sukamojo judesio), tai bėgūnai yra ekonomiškiausi įrenginiai rupiai (iki 0,2...0,5 mm) malti sausoms arba gana drėgnoms (iki 15...16 %) medžiagoms (didžiausias trūkumas – palyginti nedidelis našumas). Bėgūnai taip pat gerai tinka drėgnoms, plastiškoms masėms (pvz., molio) paruošti, nes jais ne tik susmulkinami kieti intarpai, bet ir gerai homogenizuojama, sutankinama masė, iš jos pašalinama nemaža dalis oro burbuliukų, įterptų homogenizuojant ją kitais įrenginiais. Sausam smulkiajam trupinimui (iki 3...8 mm) bėgūnai naudojami retai, nes jie ne tokie efektyvūs kaip valciniai trupintuvai.

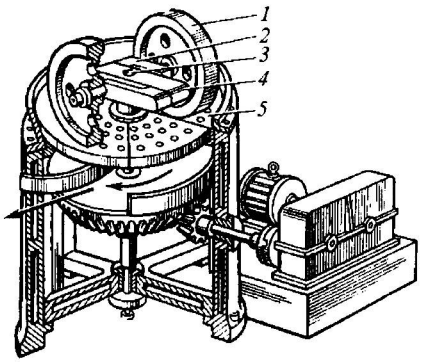
Skiriami dviejų pagrindinių tipų bėgūnai: 1) kai lėkštė įtvirtinta nejudamai, o ant jos apskritimu ridenami masyvūs ristuvai (11.19 pav., *a* ir *b*); 2) kai sukama lėkštė, o ristuvai dėl trinties rieda tik apie savo ašį (11.19 pav., *c, d, e*).

Pirmojo tipo bėgūnams būdinga tai, kad atraminį guolį veikia mažesnės apkrovos (be lėkštės masės) ir medžiagos smulkinimo ant lėkštės trukmei neturi įtakos išcentrinės jėgos. Tačiau riedant apskritimu masyviems ristuvams, atsiranda didelės išcentrinės jėgos, todėl reikia riboti jų sukimosi greitį, kad nesulinktų vertikalusis velenas.

Antrojo tipo bėgūnų smulkinimo procesas tolygesnis, ramesnis, tačiau reikia riboti ir jų lėkštės sukimo greitį (iki 0,3...0,6 aps./s), kad išcentrinės jėgos per greitai nenustumtų nepakankamai susmulkintos medžiagos į lėkštės kraštus. Be to, juose susidaro daug didesnės apkrovos į atraminius guolius.

Išcentrinė jėga šiuolaikiniuose bėgūnuose panaudojama susmulkintai medžiagai iškrauti pro nedidelį vertikalų tarpą, esantį lėkštės borte (11.19 pav., *c*). Šio tipo bėgūnuose naudojami didelės masės ristuvai, todėl medžiaga intensyviai smulkinama net sukant lėkštę gana dideliu greičiu (apie 0,9 aps./s, esant linijiniam periferinių taškų greičiui 5...6 m/s). Nepakankamai susmulkintos medžiagos dalelės mentėmis grąžinamos papildomai smulkinti. Šio tipo bėgūnai yra labai našūs (iki 75 t/h), naudoja mažiau energijos, be to, jais galima smulkinti ir didesnio drėgnio (12...14 %) medžiagas, nes lėkštės kraštuose nėra sietų, kurie užsikemša.

Pirmojo tipo bėgūnai (11.20 pav.) dažnai naudojami plastiškoms masėms paruošti. Juose ristuvai *1* yra sukami ant skylėtos nejudamos lėkštės *5* per švaistiklius *2*, kurie leidžia ristuvams pasikelti, patekus per daug tvirtos medžiagos intarpui arba storėjant ant lėkštės smulkinamos medžiagos sluoksniui. Tam, kad medžiaga būtų smulkinama ant didesnio lėkštės ploto, ristuvai įtvirtinami nevienodu atstumu nuo centro. Ovalinės (nuo 6 × 30 iki 12 × 40 mm) skylutės lėkštėje būna kūginio profilio, platėjančios į apačią. Bėgūnuose taip pat yra nužeriamosios mentės, kurios tolygiai paskirsto trupinamą medžiagą po ristuvais ir nuo lėkštės bei jos bortų nuvalo prilipusią medžiagą.



11.20 pav. Bėgūnų su nejudama skylėta lėkšte konstrukcinė schema:
1 – sukamieji ristuvai, *2* – švaistikliai, *3* – vertikalusis velenas,
4 – švaistiklius ir veleną jungianti plokštė – apkaba,
5 – nejudamai įtvirtinta skylėta plokštė

Bėgūnų, turinčių sukamąją lėkštę, ristuvų velenai dažnai prie lėkštės papildomai spaudžiami pneumatiniais (11.19 pav., *c*) arba spyruokliniais (11.19 pav., *e*) įrenginiais. Tokių bėgūnų ristuvai gali būti daug mažesnės masės, todėl apie 50 % sumažėja smulkinimo energijos sąnaudos, be to, smulkinant skirtingo stiprio medžiagas, galima reguliuoti jų spaudimo jėgą.

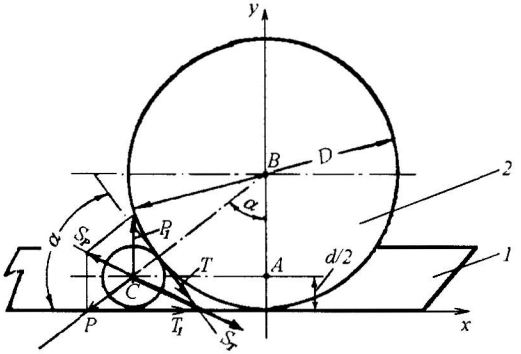
Pagal technologinę paskirtį bėgūnai gali būti šlapiojo, pussausio ir sausojo smulkinimo; smulkinimo ir homogenizavimo; tik homogenizavimo; žaliavų mišinio briketavimo; su metaliniais ristuvais ir lėkšte; su akmeniniais ristuvais ir lėkšte (kai svarbu, kad susmulkintoje medžiagoje nebūtų metalo priemaišų). Pastaruoju atveju ristuvai gaminami iš granito, kvarcito, fajanso, išliejami iš bazalto ir panašaus stiprumo uolienų; tokių pat medžiagų akmeninėmis plokštėmis išklojama ir bėgūnų lėkštė.

Metaliniai bėgūnų ristuvai yra apvilkti lengvai pakeičiamu apvalkalu, prie ristuvų korpuso pritvirtinamu pleištais, suveržiamais varžtais.

Periodinių maišymo bėgūnų lėkštė yra gilesnė ir ištisinė (be skylučių arba sieto), jų ristuvų masė 26...30 % mažesnė, palyginti su sausojo smulkinimo bėgūnais. Maišoma masė dažnai kartu ir drėkinama.

Bėgūnų skaičiavimai. *Bėgūnų griebimo kampo* α dydis nustatomas, išnagrinėjus jėgų, kurios veikia gabaliuką jo įtraukimo po riedančiu ristuvu (11.21 pav.) momentu, dedamąsias.

Šiuo momentu medžiagos gabaliuką tuo pat metu veikia ristuvo gniuždymo jėga P, gabaliuko reakcijos į lėkštę jėga P_1 ir trinties jėgos T bei T_1. Tam, kad gabaliukas nebūtų išstumtas iš po riedančio ristuvo, gniuždymo jėgų P ir P_1 dedamoji S_p turi būti mažesnė už trinties jėgų dedamąją S_T: $S_p \leq S_T$. Išanalizavus veikiančių jėgų projekcijas į ašis x ir y, nesunkiai įrodoma, kad ši sąlyga tenkinama, kai $\alpha \leq 2\varphi$.



11.21 pav. Bėgūnų griebimo kampo α ir ristuvo skersmens D nustatymo schema: *1* – bėgūnų lėkštė, *2* – ristuvas

Bėgūnų ristuvo ir trupinamos medžiagos gabaliuko skersmenų santykis D/d nesunkiai nustatomas iš 11.21 pav. parodyto stačiojo trikampio ABC:

$$\cos\alpha = AB/BC = (D/2 - d/2)/(D/2 + d/2).$$

Iš čia:

$$\frac{D}{d} = \frac{1+\cos\alpha}{1-\cos\alpha}. \qquad (11.65)$$

Bėgūnais smulkinamų medžiagų trinties koeficientas f gali būti 0,3...0,5. Tai atitinka griebimo kampus $\alpha_1 = 30°$ (smulkinant sausas kietas medžiagas) ir $\alpha_2 = 50°$ (smulkinant drėgną molį). Įrašę šias vertes į (11.65) lygtį, gauname, kad:

a) trupinant sausas medžiagas, $D/d \approx 14$;

b) trupinant drėgną molį, $D/d \approx 5$.

Kad bėgūnai dirbtų patikimai, smulkinimo praktikoje šios vertės padidinamos dar 10...20 %.

Esant kitokioms trinties koeficiento f vertėms, didžiausias pradinių gabaliukų dydis dar gali būti apskaičiuojamas pagal formulę

$$D \geq (1/f^2)\cdot d. \qquad (11.66)$$

Didžiausias leistinas bėgūnų lėkštės kampinis sukimosi greitis ω, rad/s, nustatomas iš sąlygos, kad smulkinamos medžiagos sunkio jėgos G sudaroma trinties jėga $T = Gf$ būtų ne mažesnė už periferinių lėkštės taškų išcentrinę jėgą $P_i = M\cdot\omega^2\cdot R$:

$$G \cdot f \geq M \cdot \omega^2 \cdot R\,. \tag{11.67}$$

Smulkinamos medžiagos masę M galime išreikšti jos sunkio jėga G:

$$M = \frac{G}{g}\,. \tag{11.68}$$

Įrašę šią išraišką į (11.67) lygtį, gauname:

$$\omega = \sqrt{\frac{f \cdot g}{R}}\,. \tag{11.69}$$

Tuomet teoriniai didžiausi leistini lėkštės kampiniai sukimosi greičiai:
a) trupinant sausas medžiagas,

$$\omega_1 \leq \sqrt{\frac{0{,}3 \cdot 9{,}81}{R}} \leq \frac{1{,}72}{\sqrt{R}}, \tag{11.70}$$

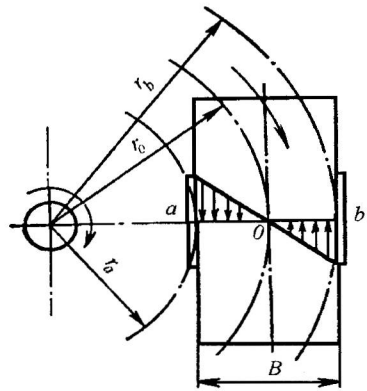
b) smulkinant drėgną molį,

$$\omega_2 \leq \sqrt{\frac{0{,}5 \cdot 9{,}81}{R}} \leq \frac{2{,}20}{\sqrt{R}}\,. \tag{11.71}$$

Smulkinant patariama šias ω vertes sumažinti 10 %.

Bėgūnų našumas priklauso nuo daugelio kintamų veiksnių, todėl dažniausiai jis parenkamas iš žinynų.

Bėgūnams reikalingo elektros variklio galia apskaičiuojama įvertinant tai, kad smulkinimo metu ristuvas ne tik rieda, bet ir slysta lėkštės paviršiumi (11.22 pav.).



11.22 pav. Ristuvo slydimo greičių pasiskirstymo schema

Ristuvui (11.22 pav.) sukantis nurodyta kryptimi lėkšte vien tik rieda apskritimu ristuvo vidurinis taškas *0*. Kad ristuvo, kurio plotis *B*, visi taškai judėtų tuo pačiu kampiniu greičiu, atkarpoje *a0* esantys taškai dar turi ir slysti judėjimo kryptimi, o atkarpoje *0b* esantys taškai turi slysti prieš judėjimo kryptį. Ristuvo slydimui sunaudojama nemaža smulkinimo energijos dalis.

Suminė bėgūnams reikalingo elektros variklio galia N_v, kW, apskaičiuojama įvertinant ir ristuvų ridenimo bei grandiklių trinties į lėkštę jėgas:

$$N_v = k_N \frac{G \cdot \omega \cdot z}{\eta} \cdot \left(\frac{f_r \cdot r_m}{1000 \cdot R} + \frac{f_{sl} \cdot B}{4000} \right); \qquad (11.72)$$

čia k_N – koeficientas, įvertinantis grandiklių trinties į lėkštę jėgas bei bėgūnų paleidimo momentą, $k_N = 1,1...1,5$; G – vieno ristuvo sunkio jėga, N; ω – vertikaliojo veleno kampinis sukimosi greitis, rad/s; z – ristuvų skaičius; η – aparato n. k., $\eta = 0,5...0,8$; f_r – riedėjimo trinties koeficientas; $f_r \approx 0,03$; r_m – vidutinis ristuvų riedėjimo spindulys, m; f_{sl} – ristuvų slydimo trinties koeficientas, $f_{sl} \approx 0,3$; B – ristuvo plotis, m.

11.1.6.5. Plaktukiniai trupintuvai ir malūnai

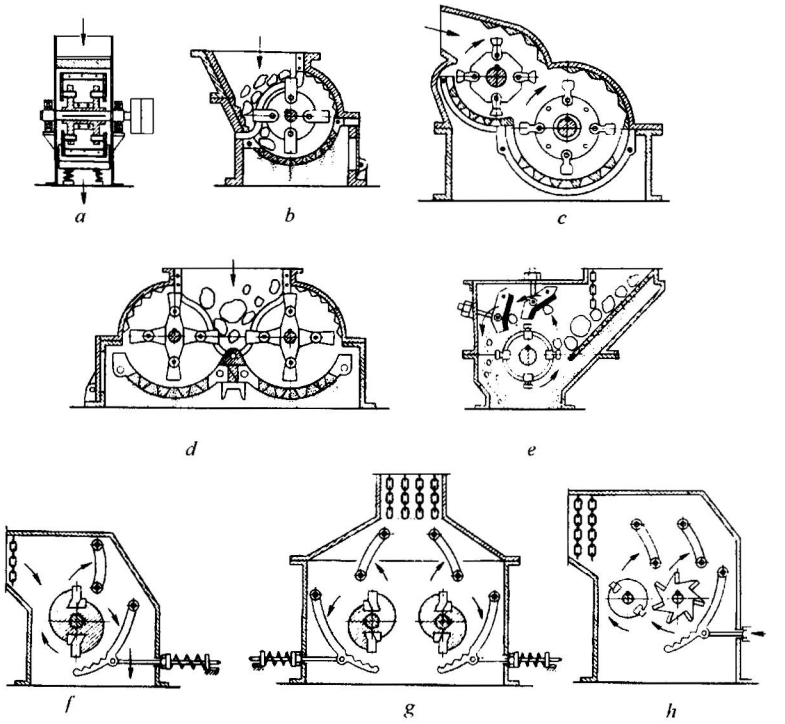
Plaktukiniai trupintuvai ir malūnai priskiriami prie *smūginių* smulkinimo aparatų. Medžiaga šiuose aparatuose smulkinama greitai besisukantiems plaktukams smūgiuojant į medžiagą, atsitrenkiant jai į trupintuvo vidinį paviršių bei trupinimo plokštes, daužantis vieniems medžiagos gabalams į kitus. Tokiu pat principu veikia dezintegratoriai, dismembratoriai ir sroviniai malūnai. Plaktukiniai trupintuvai ir malūnai naudojami vidutinio arba mažo stiprio, neabrazyvioms ir nedidelio drėgnio medžiagoms smulkinti.

Plaktukiniais trupintuvais vadinami įrenginiai su nedideliu skaičiumi didelės masės (20...70 kg) plaktukų, sukamų palyginti nedideliu linijiniu apskritiminiu greičiu (15...25 m/s). Sutrupinta medžiaga būna smulkių trupinėlių pavidalo, joje turi būti nedidelis kiekis smulkios (miltelių pavidalo) frakcijos.

Plaktukiniais malūnais vadinami įrenginiai su dideliu skaičiumi (300 ir daugiau) nedidelės masės (2...5 kg) plaktukų, sukamų dideliu apskritiminiu linijiniu greičiu (30...200 m/s ir didesniu). Susmulkinta medžiaga būna miltelių pavidalo. Plaktukinių trupintuvų veikimo schemos pateiktos (11.23 pav.).

Pagrindinis plaktukinių trupintuvų darbo elementas yra rotorius, prie kurio korpuso šarnyriškai (11.23 pav., *a*, *b*, *c* ir *d*) arba nejudamai pritvirtinti plaktukai (11.23 pav., *e*) arba išilginės sijelės (11.23 pav., *f*, *g* ir *h*). Pagal rotorių skaičių plaktukiniai trupintuvai gali būti vienrotoriai (*a*, *b*, *e* ir *f*) arba dvirotoriai (*c*, *d*, *g* ir *h*). Dvirotorių trupintuvų didesnis smulkinimo laipsnis, į juos galima tiekti gerokai didesnius medžiagos gabalus nei į vienrotorius. Ypač didelius gabalus (1000 mm ir didesnius) galima tiekti į dvirotorį trupintuvą su lyros pavidalo priėmimo kamera (11.23 pav., *d*), kurios platesnėje

dalyje susmulkinti mažesni gabalai toliau yra smulkinami apatinėje siauresnėje dalyje. Šiais trupintuvais pradiniai gabalai susmulkinami iki 35...40 mm dydžio, todėl smulkinimo laipsnis būna $i = 25...30$ ir daugiau.



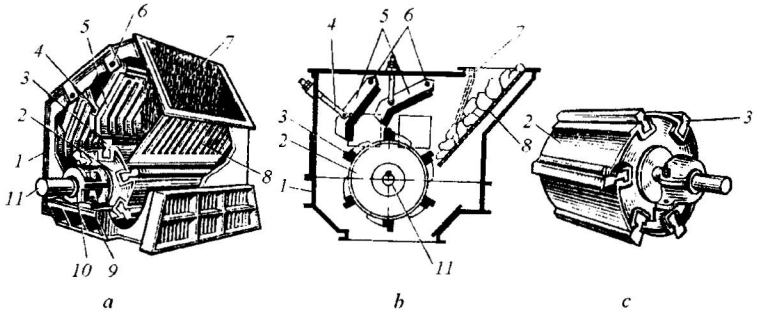
11.23 pav. Plaktukinių trupintuvų tipai

Iš trupintuvų susmulkinta medžiaga dažniausiai iškrinta pro apatinėje dalyje esančių rūšiuojamųjų ardelių skylutes (11.23 pav., *a*, *b*, *c* ir *d*). Trupinimo efektyvumui padidinti trupintuvuose dažnai įtaisomos atmušamosios plokštės (*e*, *f*, *g* ir *h*), trupintuvo korpuso vidiniai paviršiai padengiami briaunotomis kietų metalų išklojomis (*b*, *c* ir *d*).

Vienrotorio plaktukinio trupintuvo su nejudamai įtvirtintais išilginiais plaktukais ir atmušamosiomis rūšiuojamosiomis plokštėmis konstrukcinė schema pateikta 11.24 paveiksle.

Trupinamos medžiagos gabalai, prilaikomi grandinių juostos *7*, tolygiai slenka žemyn rūšiuojamaisiais ardeliais *8*. Pro skylutes nepraėję gabaliukai nukrinta ant greitai sukamo rotoriaus ir plaktukais trupinami bei sviedžiami ant atmušamųjų rūšiuojamųjų plokščių *5*. Pakankamai smulkūs gabaliukai

praeina pro šiose plokštėse esančius plyšelius ir nukrinta į apatinę trupintuvo dalį. Nepakankamai smulkūs gabaliukai atsimuša nuo plokščių ir vėl krinta ant besisukančio rotoriaus ir toliau trupinami. Rūšiuojamieji ardeliai *8* ir rūšiuojamosios atmušamosios plokštės *5* su plyšeliais iš smulkinamos medžiagos atskiria pakankamai smulkias daleles.

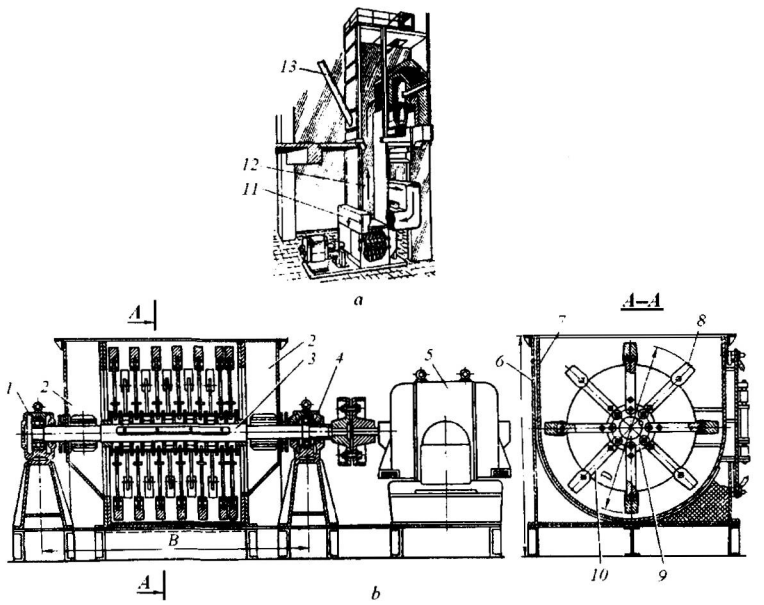


11.24 pav. Vienrotoris plaktukinis trupintuvas:
a – bendras vaizdas, *b* – veikimo schema, *c* – rotorius;
1 – surenkamasis korpusas, iš vidaus padengtas plienine iškloja, *2* – masyvus rotorius, *3* – išilginiai apverčiamieji plaktukai, *4* – viršutinės atmušamosios rūšiuojamosios plokštės *5* reguliavimo varžtai, *6* – atmušamųjų plokščių įtvirtinimo strypas, *7* – grandinių juosta trupinamai medžiagai tolygiai tiekiti į trupinimo zoną, *8* – viršutiniai ardeliai, *9* – rutulinių guolių *10* tvirtinimo kronšteinai, *11* – rotoriaus velenas

Plaktukiniuose šachtiniuose malūnuose (11.25 pav.) smulkinama medžiaga kartu džiovinama arba dehidratuojama.

Smulkinama medžiaga į malūną tiekiama lataku *13*, o iš jo krinta ant greitai (v = *30...60* m/s) sukamų rotoriaus plaktukų. Į apatinę šachtos *12* dalį kanalais *2* tiekiamos karštos dujos, su kurių srautu į šachtos viršutinę dalį kyla ir smulkinamos medžiagos dalelės. Pakankamai smulkias ir termiškai apdorotas (išdžiovintas arba dehidratuotas) daleles kylantis dujų srautas išneša iš šachtos, o per stambios dalelės nukrinta žemyn ir smulkinamos toliau. Taigi šachta yra ne tik terminio apdorojimo, bet ir dalelių rūšiavimo pagal dydį elementas. Plaktukai, kurie yra gaminami iš manganu legiruoto plieno arba baltojo ketaus, diskiniuose laikikliuose gali būti įtvirtinami arčiau arba toliau (kai nusidėvi) nuo rotoriaus veleno ašinės linijos.

Plaktukinių trupintuvų rotoriaus ilgis L būna 0,5...1,33 karto didesnis už jo skersmenį (D = *400...1500* mm).



11.25 pav. Plaktukinis šachtinis malūnas: *a* – bendras vaizdas, *b* – veikimo schema; *1* ir *4* – guoliai, *2* – šoniniai karštų dujų tiekimo kanalai, *3* – rotoriaus velenas, *5* – elektros variklis, *6* – korpusas, *7* – iškloja, *8* – šarnyriškai įtvirtinti plaktukai, *9* – rotoriaus diskai su plaktukų laikikliais *10*, *11* – karštų dujų tiekimo atvamzdis, *12* – rūšiavimo šachta, *13* – smulkinamos medžiagos tiekimo latakas

Plaktukinių trupintuvų skaičiavimai. Plaktukinių trupintuvų našumas G_m, t/h, apytiksliai apskaičiuojamas pagal empirines lygtis:

$$G_m = \frac{L \cdot D^2 \cdot n^2 \cdot k}{3600 \cdot (i-1)}, \tag{11.73}$$

$$G_m = (30...45) \cdot L \cdot D. \tag{11.74}$$

Arba, trupinant vidutinio stiprio medžiagas iki 15...25 mm dydžio gabaliukų,

$$G_m = L \cdot D \cdot b; \tag{11.75}$$

čia L – rotoriaus ilgis, m; D – rotoriaus skersmuo (pagal išorinį besisukančių plaktukų tašką), m; n – rotoriaus sukimosi dažnis aps./min; i – smulkinimo laipsnis; k – koeficientas, įvertinantis trupintuvo konstrukciją ir trupinamos medžiagos stiprumą ($k \approx 2$); b – ardelių skylučių plotis, m.

Reikalingo elektros variklio galia N_v, kW, apytiksliai gali būti apskaičiuojama iš empirinių lygčių:

$$N_v = 7{,}5 \cdot D \cdot L \cdot n/60\ ;\ N_v = 0{,}15 \cdot D \cdot L \cdot n\ ;\ N_v = 0{,}1....0{,}15 \cdot G_m \cdot i\ .\quad (11.76)$$

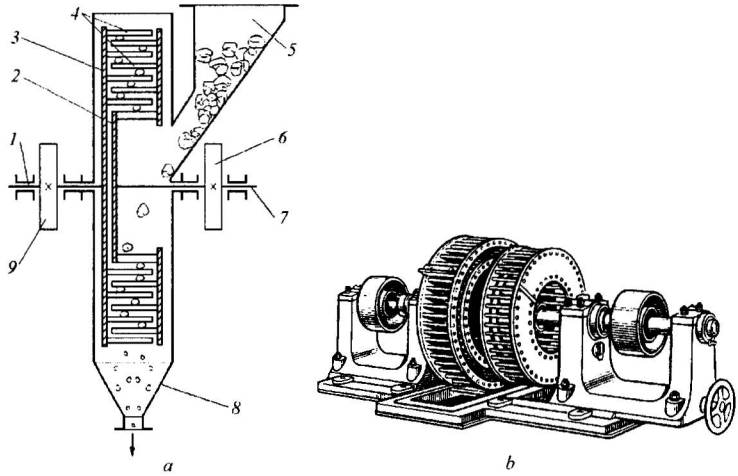
Plaktukinių trupintuvų ir malūnų teigiamybės: nesudėtingos konstrukcijos, nedidelė įrenginių masė ir matmenys, nedidelės metalo sąnaudos, gana didelis smulkinimo laipsnis, nedidelės savitosios smulkinimo energijos sąnaudos. Didžiausi trūkumai: greitas plaktukų, ardelių, atmušamųjų plokščių bei išklojų išsidėvėjimas, smulkinant kietas abrazyvias medžiagas; ardelių užsikimšimas, smulkinant drėgnas medžiagas.

11.1.6.6. Dezintegratoriai ir dismembratoriai

Šių aparatų veikimo principas panašus į plaktukinių malūnų. Medžiaga juose smulkinama dideliu greičiu (optimalus $w = 40...45$ m/s) sukamų metalinių pirštų smūgiais (11.26 pav.). Pirštai, kurie gali būti iš plieno, bronzos, duraliuminio ar kitų metalų lydinio, sumontuojami ant plieninių diskų *2* ir *3* koncentriniais apskritimais, o laisvi pirštų galai sujungiami plieniniais žiedais. Gaunami du rotoriai, kurių metalinių pirštų eilės išdėstomos taip, kad vieno rotoriaus pirštų eilės galėtų įsiterpti į tarpus tarp kito disko pirštų eilių, sustūmus diskus. Diskai turi atskiras pavaras *6* ir *9* ir sukami priešingomis kryptimis, jų velenai *1* ir *7* įtvirtinti rutuliniuose guoliuose. Rotoriai įtaisomi iš plieno lakštų suvirintame korpuse.

Smulkinamos medžiagos gabaliukai, kurių dydis neviršija 25...35 mm, o drėgnis 8...11 %, lataku *5* tiekiami į dezintegratoriaus centrinę dalį ir krinta ant greitai sukamos pirmosios pirštų eilės. Atstumai tarp pirštų šioje eilėje yra didžiausi ir mažėja, eilėms tolstant nuo centro. Viename diske būna nuo dviejų iki keturių pirštų eilių, taigi dezintegratoriuose iš viso būna nuo keturių iki aštuonių eilių. Kadangi kas antra dezintegratoriaus pirštų eilė yra sukama priešinga kryptimi, tai smulkinamos medžiagos gabaliukai juda žemyn zigzagais ir kartu yra intensyviai maišomi, homogenizuojami, o pirštų eilės neužsikemša net smulkinant gana didelio drėgnio (8...11 %) arba pluoštines, elastingas medžiagas (gumos, medienos atliekas).

Susmulkinta medžiaga iškrinta į kūginį antgalį *8*. Aparatų smulkinimo laipsnis priklauso nuo diskų sukimo greičio ir pirštų eilių skaičiaus. Dezintegratoriai dažniausiai naudojami smulkiai trupinti arba rupiai malti (dalelių dydis < 0,3 mm) minkštoms, neabrazyvioms, nedidelio stiprumo medžiagoms, tokioms kaip akmens anglys, amonio druskos, pigmentai, džiovintas molis, klintys, kreida, trepelis, gipsas, siera, durpės, medžio ir gumos atliekos, žuvų kaulai ir pan.



11.26 pav. Dezintegratorius: *a* – veikimo principinė schema, *b* – konstrukcinė schema

Tam, kad galima būtų nuvalyti pirštų eiles arba pakeisti žiedus su susidėvėjusiais pirštais, vienas diskas, sukant sraigtą, nesunkiai atitraukiamas (11.26 pav., *b*).

Dismembratoriai nuo dezintegratorių skiriasi tuo, kad jų tik vienas rotorius yra sukamas, o kitas nejudamai sumontuotos ant šarnyriškai atidaromos korpuso sienelės. Dismembratoriai yra kompaktiškesni už dezintegratorius, tačiau efektyvių smūgių būna mažiau.

Dezintegratoriai ir dismembratoriai naudojami medžiagoms sausai smulkinti tiek atviru, tiek uždaru ciklu (su separatoriumi). Pastaruoju atveju, leidžiant per šiuos įrenginius dujų srautą, galima keisti sumalimo smulkumą ir gauti vienodesnes 0,05...0,07 mm dydžio medžiagos daleles.

Dezintegratorių ir dismembratorių našumas ir reikalingo elektros variklio galia parenkami iš žinynų.

Dezintegratorių teigiamybės: smulkinimo metu medžiaga intensyviai maišoma, homogenizuojama; galima smulkinti gana drėgnas ir elastingas medžiagas, nes įrenginys neužsikemša; galima pasiekti gana didelį susmulkinimo laipsnį; nesudėtinga įrenginio konstrukcija ir jo priežiūra.

Dezintegratoriai kartais naudojami mišinio komponentams kokybiškai sumaišyti.

Didžiausi trūkumai: greitai išsidėvi metaliniai pirštai, todėl netinka abrazyvioms medžiagoms smulkinti (medžiagos užteršiamos pirštų metalo priemaišomis); palyginti didelės smulkinimo energijos sąnaudos; nevienodai išsidėvėjus pirštams pažeidžiamas rotorių diskų balansavimas, o dėl to daug greičiau išsidėvi veleno guoliai.

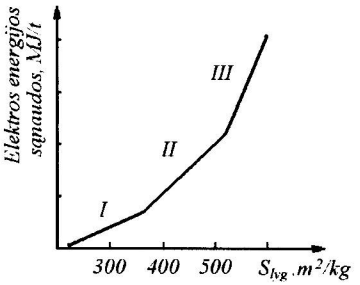
11.2. Malimas

11.2.1. Malimo procesų dėsningumai

Malimo proceso tikslas – gauti smulkius medžiagų miltelius. Malant medžiagas padidinamas jų tirpimo greitis, cheminis aktyvumas, reakcijų greičiai, nes padidėja ne tik medžiagų dalelių savitasis paviršius, bet ir jų paviršinių sluoksnių struktūros defektingumas. Malant galima gerai suvienodinti medžiagų mišinių fizikines mechanines savybes, jų drėgnį, cheminę ir mineralinę sudėtį. Dažnai malimo smulkumu galima keisti cheminių reakcijų pobūdį, jų mechanizmą arba gaunamų produktų technologines ir eksploatacines savybes. *Po cheminės sudėties smulkumas dažnai yra antra pagal svarbą savybė, lemianti cheminio produkto kokybę, jo technologines savybes, naudojimo sritis.* Todėl cheminėje technologijoje malimas dažnai yra labai svarbi ne tik pradinių žaliavų paruošimo gamybai, bet ir gauto produkto paruošimo eksploatuoti stadija.

Nustatyta, kad malimo energijos sąnaudos, didėjant malimo smulkumui, kinta netolygiai. 11.27 pav. pateikta portlandcemenčio klinkerio malimo energijos sąnaudų ir malinio smulkumo sąryšio kreivė, kurioje galima išskirti tris malimo stadijas: I – rupiojo, II – vidutinio ir III – smulkiojo malimo.

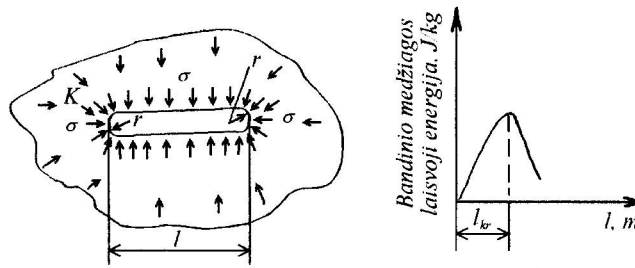
Rupiojo malimo stadijoje malamumą daugiausia lemia pradiniuose gabaliukuose trupinimo metu susidarę struktūros makrodefektai (įtrūkimai), mikrodefektai ir gabaliuko medžiagos akytumas. Veikiant šiuos gabaliukus išorine jėga, juose atsiranda vidinių įtempių.



11.27 pav. Portlandcemenčio klinkerio malimo energijos sąnaudų ir malinio smulkumo sąryšio kreivė

Nustatyta, kad apie mikroplyšelius susikoncentruoja vidiniai įtempiai (11.28 pav., *a*) ir plyšelių galuose jų visada yra K kartų daugiau, negu vidutiniškai medžiagoje. Įtempių koncentracijos koeficientas K mikroplyšelių galuose priklauso nuo plyšelio ilgio l ir nuo jo kreivumo spindulio r:

$$K \approx 1 + 2\sqrt{l/r}\,. \qquad (11.77)$$



11.28 pav. Mikroplyšelio didėjimo smulkinamoje medžiagoje priežastys: *a* – vidinių įtempių koncentracija apie mikroplyšelio kraštus, *b* – mikroplyšelio didėjimo laisvosios energijos priklausomybės nuo mikroplyšelio ilgio kreivė

Kietojo kūno fizikos tyrimais (Grifitsas) nustatyta, kad dėl šių vidinių įtempių mikroplyšelių ilgis didėja, o pasiekęs tam tikrą „kritinį“ ilgį l_{kr} (nuo keleto iki keliolikos mikronų) mikroplyšelis labai greitai didėja net pašalinus išorinę apkrovą (11.28 pav., *b*), medžiagai pereinant į stabilesnę termodinaminę būseną. Jam toliau maksimaliu augimo greičiu (~ 38 % garso sklidimo medžiagoje greičio) didėjant, medžiaga staigiai suyra. Mikroplyšelių įtaka kietų medžiagų realiam stiprumui yra labai didelė. Poliani ir Arovano metodais iš medžiagos kristalinės struktūros sublimacijos šilumos arba ryšio jėgų apskaičiuotas *teorinis medžiagų stiprumas* σ_o turėtų sudaryti apie dešimtąją dalį jų tamprumo modulio E vertės (t. y. $\sigma_o \approx 0{,}1 \cdot E$ arba $10^9...10^{10}$ Pa), o techninis (realus) medžiagų stiprumas σ_r dėl struktūros makro- bei mikrodefektų, mikroplyšelių ir akytumo yra daug kartų mažesnis (metalų σ_o/σ_r būna 60...100, o kristalinių neorganinių medžiagų dar didesnis – 100...1000).

Smulkinant medžiagas, visada reikia atsižvelgti į vadinamąjį *mastelio faktorių*, t. y. tai, kad, medžiagos dalelei mažėjant, mažėja ir joje esančių makro- ir mikrodefektų bei mikroplyšelių skaičius, todėl tos pačios medžiagos stiprumas didėja ir jai susmulkinti reikia vis daugiau energijos. Anksčiau minėti reiškiniai paaiškina, kodėl *rupiojo malimo* stadijoje, kai smulkinami stambesni gabaliukai su didesniu makro- bei mikrodefektų ir mikroplyšelių skaičiumi, smulkinimo energijos sąnaudos yra mažesnės, o pereinant prie *vidutinio smulkumo malimo* (11.27 pav., II stadija), kai reikia toliau smulkinti

jau smulkias, miltelių pavidalo „sustiprėjusias" pradinės medžiagos daleles, labai padidėja. Trečiojoje, *smulkiojo malimo*, stadijoje smulkinimo energijos sąnaudos labai padidėja dėl savaiminės smulkinamų labai smulkių dalelių agregacijos (sulipimo) ir jų adhezijos (prilipimo) prie malimo aparatų vidinių paviršių bei malimo kūnų darbinių paviršių.

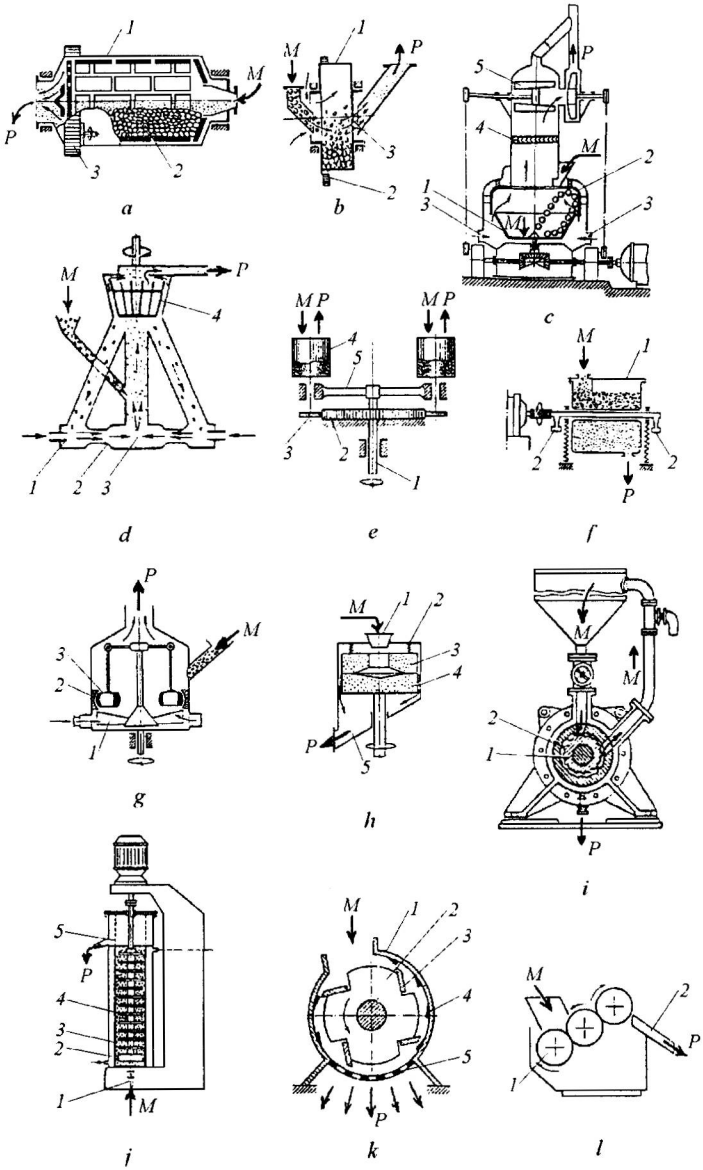
Malant ne tik susidaro nauji paviršiai, bet ir dalelės įgyja elektros krūvį. Šio krūvio ženklas ir dydis priklauso nuo malamos medžiagos cheminės sudėties ir dalelių dydžio. Malamos medžiagos dalelių elektriniams potencialams padidėjus iki tam tikro dydžio, dalelės savaime agreguojasi ir susidaro gumulėliai. Nustatyta, kad, suartėjus labai smulkioms dalelėms, autohezinė sąveika pasireiškia net tarp tos pačios medžiagos dalelių. Savaime susidarius gumulėliams, medžiaga tampa nevienalytė, sumažėja jos savitasis paviršius. Todėl trečiojoje malimo stadijoje daug energijos naudojama ne medžiagai toliau smulkinti, bet naujai susidarantiems agregatams, gumulėliams ardyti. Dėl šios priežasties priklausomai nuo kiekvieno galutinio produkto paskirties nustatomos jo *racionalaus smulkumo ribos.* Pvz., aukštų markių portlandcemenčio malinio smulkumas turi būti $S = 500...700$ m^2/kg.

11.2.2. Malūnai

Priklausomai nuo gabaliukų arba dalelių dydžio prieš malimą, reikiamo malimo smulkumo ir našumo naudojami įvairūs malūnai (11.29 pav.).

Chemijos pramonėje dažnai reikia smulkiai sumalti didelius medžiagų kiekius. Reikiamą našumą galima pasiekti tik *būgniniais malūnais* (11.29 pav., *a*), kurie pagal sukamo būgno geometrinę formą bei jo matmenis ir malimo kūnus skirstomi į rutulinius, cilindrinius, kūginius, „Aerofol" ir „Hidrofol". Visų jų pagrindinis konstrukcinis elementas yra galingų elektros variklių sukamas metalinis būgnas *1*, kurio 35...40 % vidinės ertmės užpildoma malimo kūnais (rutuliais, cilindrais, nupjautais kūgeliais). Medžiaga šiuose malūnuose smulkinama laisvai krintančių malimo kūnų ir stambesnių medžiagos gabalų („Aerofol" ir „Hidrofol" malūnuose) smūgiais, taip pat smulkesnių dalelių trynimu.

Pagrindinės šių malūnų teigiamybės: galima pasiekti didelį našumą, lengva reguliuoti reikiamą sumalimo smulkumą, paprasta jų konstrukcija, didelis patikimumas. Didžiausi trūkumai: labai didelė būgnų masė, todėl didelės metalo sąnaudos; reikalingi labai didelės galios (kelių tūkstančių kW) elektros varikliai; malimo kūnai malimo metu smarkiai dėvisi, todėl sumaltas produktas labai užteršiamas metalų dalelėmis; mažas malūnų naudingumo koeficientas (iki 10 %); triukšmingas darbas.



11.29 pav. Malūnų principinės schemos: *a* – būgninių, *b* – „Aerofol“, *c* – rutulinių išcentrinių, *d* – srovinių, *e* – planetinių, *f* – vibracinių, *g* – ritinėlinių, *h* – žiedinių, *i* – kavitacinių, *j* – biserinių, *k* – peilinių, *l* – valcinių; *M* – smulkinti tiekiama medžiaga, *P* – susmulkintas produktas

Būgninių rutulinių malūnų smulkinimo laipsnis $i = 20...100$.

Didelio našumo gamyboje vis plačiau naudojami būgniniai malūnai „Aerofol" ir „Hidrofol", kurių būgno skersmuo siekia 6...8 m. Kartais šie malūnai vadinami *būgniniais berutuliais* malūnais, nes juose medžiaga daugiausia yra smulkinama iš didelio aukščio kartu su besisukančiu būgnu *1* pakilusių ir krintančių stambių gabalų smūgiais į smulkesnius medžiagos gabalus. Į būgninius rutulinius malūnus reikia tiekti iki 5...10 mm sutrupintos medžiagos gabalėlius, o į „Aerofol" ir „Hidrofol" malūnus gali būti tiekiami ir gerokai didesni (300...400 mm) pradinės medžiagos (*M*) gabalai. Tačiau malant šiais malūnais susidaro nemažas kiekis vadinamosios „kritinės" frakcijos (10...15 mm dydžio gabaliukų), kurie patys neefektyviai smulkina mažesnius gabaliukus ir yra sunkiai smulkinami stambių krintančios medžiagos gabalų, todėl paprastai ir į šio tipo malūnus dedamas nedidelis kiekis (~ 3 % vidinio būgno tūrio) malimo kūnų arba ši frakcija malama atskirai būgniniais rutuliniais malūnais. Pakankamai smulki frakcija su oro srautu pro skylėtą pertvarą *3* išnešama iš malūno į separatorius. Pagrindinės „Aerofol" ir „Hidrofol" malūnų teigiamybės: didelis malimo proceso efektyvumas, malamas produktas mažai užteršiamas metalų dalelėmis. Didžiausi trūkumai: didelė masė, dideli matmenys, būtina papildomai smulkinti vidutinę frakciją. Šio tipo malūnais galima pasiekti didelį smulkinimo laipsnį: $i = 180...300$.

Rutuliniais išcentriniais malūnais (11.29 pav., *c*) malama minkštos neabrazyvios medžiagos (pvz., kreida, talkas ir kt.). Medžiaga malama sukamoje gilioje lėkštėje *1* krintančių ir dėl išcentrinių jėgų riedančių malimo kūnų *2*. Smulkios medžiagos dalelės pro antgalius *3* į malūną tiekiamo oro srautu iš lėkštės yra išnešamos į viršutinę malūno dalį – šachtą. Per stambios medžiagos dalelės, atsitrenkusios į atmušamąsias groteles *4* ir orinį separatorių *5*, krinta žemyn į besisukančią lėkštę *1*, kur smulkinamos toliau. Didžiausia šių malūnų teigiamybė – didelis našumas, nes įrenginys yra nuolatinis. Didžiausi trūkumai: didelis malimo kūnų ir lėkštės išsidėvėjimas, darbo metu keliamas didelis triukšmas. Šių malūnų $i = 5...100$ (galima reguliuoti grotelėmis ir oriniu separatoriumi).

Sroviniai malūnai (11.29 pav., *d*) smulkina medžiagas malimo kameroje *3*, susiduriant priešpriešiais dideliu greičiu (nuo 100 iki 180 m/s) judantiems turbulentiniams srautams. Į ežekcijos principu veikiančius antgalius *1* yra įtraukiamos iš pirminio separatoriaus *4* grąžinamos per stambios medžiagos dalelės. Pakankamai smulki frakcija, perėjusi per separatorių, galutinai nusodinama ciklonuose ir filtruose. Šių malūnų teigiamybės: malama medžiaga beveik neužsiteršia metalu, darbo metu nėra didelio triukšmo, įrenginys labai patikimas, nes nėra judančių ir greitai dylančių dalių, didelis malimo proceso efektyvumas, galima sumalti labai smulkiai (< 0,005 mm), malūnus lengva automatizuoti ir jungti į didelio našumo (iki 160 t/h) agregatus. Malūnais

efektyviai malamos polimineralinės medžiagos (pvz., portlandcemenčio klinkeris), kai atskirų mineralų savybės (stiprumas, kietumas) yra skirtingos. Galima smulkinti termolabilias medžiagas (pvz., $(NH_4)_2SO_4$, dažų komponentus), nes smulkinama medžiaga neįkaista; juose taip pat galima suderinti smulkinimo ir džiovinimo procesus, tiekiant kompresoriais karštas degimo dujas, karštą orą arba perkaitintus vandens garus. Į šiuos malūnus lataku tiekiamos gana smulkios medžiagos dalelės, todėl smulkinimo laipsnis nėra labai didelis $i = 20...120$. Didžiausias tokių malūnų trūkumas tas, kad reikia nemaža papildomų įrenginių (kompresorių, separavimo ir dulkių valymo įrenginių).

Šio tipo malūnais smulkinamas koksas, klintis, žėručiai, taip pat plastmasės, insekticidai ir kitos medžiagos.

Planetiniai malūnai (11.29 pav., *e*) dažniausiai naudojami medžiagoms greitai susmulkinti, ruošiant jas ekspresanalizei. Šiuose malūnuose ant bendro skriejiko *5* atšakų yra sumontuojama keletas būgnų *4*, pripildytų malimo kūnų. Prie kiekvieno būgno ašies pritvirtinami mažesni krumpliaračiai *3*, kurie, sukant velenu *1* skriejiką, rieda apie nejudamą didįjį krumpliaratį *2*. Taigi būgnai tuo pačiu metu sukasi apie savo ašį ir apie centrinę skriejiko ašį, dėl to juose esantys malimo kūnai daro sudėtingus judesius su dideliais pagreitėjimais ir taip pasiekiamas didelis smulkinimo proceso intensyvumas. Didžiausia šių malūnų teigiamybė ir yra didelis smulkinimo efektyvumas. Didžiausi trūkumai: malimo proceso periodiškumas, nedidelis našumas, be to, malama medžiaga labai įkaista. Šių malūnų $i = 20...300$; jie naudojami ne tik laboratorijose, bet ir kai kurioms labai kietoms medžiagoms smulkinti, pvz., perdirbant titano rūdas.

Vibracinių malūnų (11.29 pav., *f*) 80...90 % būgno vidinio tūrio ertmės yra pripildyta smulkių malimo kūnų (rutulių). Būgno korpusas *1* remiasi į spyruokles, o jo centrinėje dalyje įmontuotas nesubalansuotas arba ekscentrinis velenas *2*, kuriam sukantis būgne esantys malimo kūnai yra vibruojami (15...50 Hz), kratomi, juda sudėtinga trajektorija, impulsais ir šitaip intensyviai smulkina ir maišo medžiagos daleles, esančias tarp malimo kūnų. Vibracinių malūnų teigiamybės: neilgai malant galima pasiekti didelį susmulkinimo laipsnį ($i = 20...200$), malūnai kompaktiški, nedidelės masės, gana didelis malimo efektyvumas. Didžiausi trūkumai: nedidelis našumas, didelis triukšmas, galima smulkinti tik pakankamai smulkius gabaliukus. Šiais malūnais galima smulkinti įvairaus stiprumo ir kietumo medžiagas: kvarcą, grafitą, dažų pigmentus (ochrą), $NaHCO_3$ ir kt.

Minkštoms, trapioms ir nelipnioms medžiagoms (pvz., išdžiovintam kaolinui, baltiems TiO_2, ZnO pigmentams, cemento klinkeriui ir kt.) labai smulkiai susmulkinti yra skirti *ritinėliniai* (11.29 pav., *g*) ir *žiediniai* (11.29 pav., *h*) malūnai.

Ritinėlinių malūnų (11.29 pav., *g*) volai arba ritinėliai *3*, sukantis apie savo ašį švaistikliniam mechanizmui, išcentrinių jėgų yra spaudžiami prie išori-

nio žiedo *2*. Smulkinama medžiaga lataku ir grandikliais 1 yra tiekiama į tarpą tarp išorinio žiedo ir ritinėlių ir jame smulkiai sutrinama. Smulkios dalelės kylančio oro srauto yra išnešamos iš malūno, patenka į separatorių, kuriame suskirstomos į gatavo produkto ir per rupią frakcijas. Rupioji frakcija lataku vėl grąžinama toliau smulkinti. Pagrindinė šių malūnų teigiamybė ta, kad galima lengvai plačiu intervalu (i = *5...100*) reguliuoti reikiamą malimo smulkumą. Didžiausi trūkumai: daug judančių detalių, kurios intensyviai dyla, sudėtinga įrenginio konstrukcija, todėl jį sunku prižiūrėti ir remontuoti. Analogišku smulkinimo laipsniu pasižymi ir *žiediniai malūnai* (11.29 pav., *h*), sudaryti iš korundinio viršutinio nejudamo žiedo (girnų) *3*, prie korpuso *2* prispaudžiamo spyruoklėmis. Smulkinama medžiaga tiekimo lataku *1* ir pro viršutiniame žiede esančią kiaurymę patenka į centrinę dalį, ant apatinio sukamojo žiedo *4*. Veikiamos išcentrinių jėgų reikiamai susmulkintos dalelės žiedų darbiniuose paviršiuose esančiais kreipiamaisiais grioveliais juda tolyn nuo centro ir iškrinta į iškrovimo lataką *5*. Didžiausia teigiamybė – didelis malimo smulkumas. Didžiausi trūkumai: nedidelis našumas, dažnai reikia keisti smulkinimo žiedus. Šio tipo malūnai dažniausiai naudojami, ruošiant dažų komponentus, taip pat popieriaus ir kartono gamyboje.

Kavitaciniai malūnai (11.29 pav., *i*) dažniausiai naudojami suspensijoms disperguoti. Šie malūnai yra sujungti su slėginiais rezervuarais, siekiant sudaryti daugkartinę suspensijos cirkuliaciją per malūną ir pasiekti didelį medžiagos dispergavimo laipsnį. Sukantis vidiniam velenui (rotoriui) *1* medžiaga yra siurbiama pro žiedinius plyšelius tarp jo ir išorinio nejudamo žiedo (statoriaus) *2* (t. y. malūnas veikia kaip siurblys). Išilginiai kanalėliai yra pleišto formos, medžiagai praeinant jais periodiškai didėja ir mažėja hidraulinis slėgis ir į suspensijoje esančias kietas daleles dirbtinai sudaromas kavitacinių smūgių efektas. Dėl šio efekto suspensijos kieta medžiaga yra intensyviai smulkinama ir, pasibaigus smulkinimo ciklui, išleidžiama pro čiaupą malūno apatinėje dalyje.

Pagrindinės tokių malūnų teigiamybės: didelis suspensijos dalelių smulkinimo laipsnis (i = *5...40*), geras suspensijos homogeniškumas. Didžiausi trūkumai: mažas našumas, intensyvus rotorių dėvėjimasis.

Šio tipo malūnai dažniausiai naudojami dažams, pigmentams, taip pat gumos mišiniams ruošti.

Analogiškas yra ir *koloidinių malūnų* veikimo principas (labai smulkiai, iki kelių mikronų smulkinant medžiagas), tik tarpas kartais sudaromas ne tarp rotoriaus ir statoriaus, bet tarp rotoriaus ir malūno korpuso. Dėl nedidelio našumo šie malūnai dažniausiai naudojami tik laboratorijose.

Emaliams, dažams, gruntams ir kitoms suspensijoms paruošti dažnai naudojami *biseriniai malūnai* (11.29 pav., *j*). Šių malūnų cilindro *3* du trečdaliai arba net trys ketvirtadaliai tūrio užpildoma specialiu kvarciniu biseriu (ϕ*1...2* mm) arba kvarciniu smėliu. Iš anksto paruošta suspensija (pvz., pig-

mentas ir rišiklis) siurbliu pro antgalį *1* tiekiama į apatinę cilindro dalį ir kyla į viršų per biserio sluoksnį, judinamą diskinio rotoriaus sukamų plokštelių *4*. Judančiame biseriniame sluoksnyje suspensijos kietosios dalelės smulkinamos intensyviai trinant. Viršutinėje malūno dalyje yra įmontuotas žiedinis sietas *5*, kurį perėjusi pakankamai smulki suspensija surenkama rinktuve ir pašalinama pro atvamzdį. Jei reikia, į apatinę cilindro apvalkalo *2* dalį suspensijai atvėsinti gali būti tiekiamas aušalas (vanduo, aušinimo mišinys).

Peiliniame malūne (11.29 pav., *k*) elastingos medžiagos (gumos, linoleumo atliekos), patekusios tarp ant rotoriaus *2* ir korpuso-statoriaus *1* sumontuotų peilių *3* ir *4*, yra kapojamos ir pjaustomos.

Pakankamai susmulkintos dalelės iškrinta pro groteles *5*. Šiais malūnais galima perdirbti neatšaldytas elastingas medžiagas ($i = 10...50$).

Dažų komponentams, taip pat polimerinėms pastoms ir kitoms medžiagoms smulkinti naudojami *valciniai malūnai* (11.29 pav., *l*), kuriuose medžiagos smulkinamos, patekusios į tarpus tarp skirtingomis kryptimis ir skirtingais greičiais besisukančių volų *1*. Susmulkinta medžiaga iškraunama pro lataką *2* grandikliais. Pagrindinė teigiamybė – didelis ir nesunkiai reguliuojamas smulkinimo laipsnis ($i = 20...300$). Trūkumai: nedidelis našumas, netolygus velenų paviršių išsidėvėjimas.

Rupiajam ir vidutiniam malimui taip pat gali būti naudojami *bėgūnai*, *dezintegratoriai, dismembratoriai, šachtiniai* (su standžiai įtvirtintais plaktukais) ir *aerospragiliniai* (su šarnyriškai įtvirtintais plaktukais) *malūnai*.

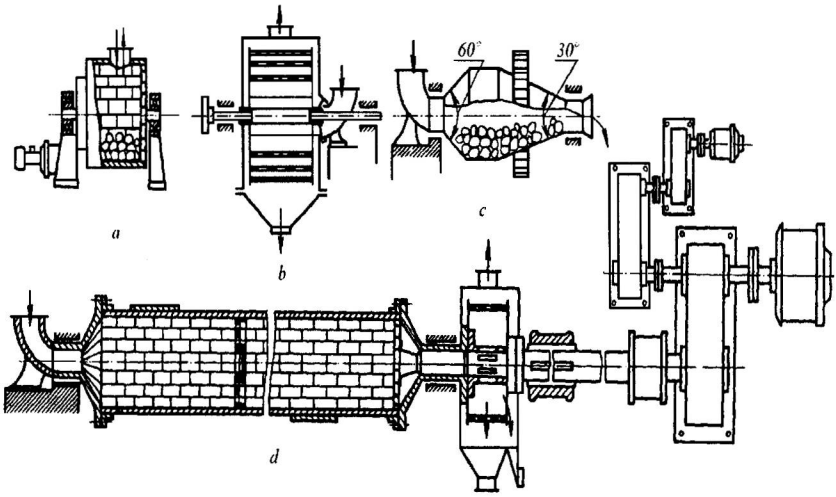
Ultragarsiniais malūnais (> 20000 Hz bangų svyravimo dažnio) paruošiami nedideli kiekiai labai smulkių ir homogeniškų suspensijų (pvz., aukštos kokybės dažų, vaistų gamyboje), tačiau dėl nedidelės ultragarso generatorių galios jie naudojami ribotai. Smulkiajam malimui kartais taikomas ir *elektrohidraulinis kietųjų medžiagų smulkinimo būdas*, kai akimirksniu išsikraunant labai aukštos įtampos kondensatoriui (kurio išsikrovimo energija E siekia 1000 MW) drėgnos medžiagos gabaliuke sukeliama smūginė hidraulinė banga, suardanti jį į smulkias dalis. Siekiant padidinti malūnų naudingumo koeficientą, kuriami ir kitais netradiciniais būdais veikiantys smulkinimo įrenginiai (labai greito slėgio arba temperatūros pakeitimo darbo kameroje, lazerio spindulių poveikiu ir kt.).

11.2.2.1. Rutuliniai malūnai

Rutuliniai malūnai dažniausiai naudojami cheminėje technologijoje, kai reikia smulkiai sumalti didelius kiekius įvairaus stiprio medžiagų. Medžiaga juose smulkinama laisvai krintančių malimo kūnų smūgiais, taip pat trintimi, gabaliukams patekus tarp būgne riedančių malimo kūnų.

Rutuliniai malūnai skirstomi pagal šiuos pagrindinius požymius: 1) pagal darbo režimą: a) periodiniai (11.30 pav., *a*) ir b) nuolatiniai (11.30 pav., *b*, *c* ir

d); 2) pagal būgno formą: a) būgniniai, kai *L/D* = *1...2* (11.31 pav., *a* ir *b*); b) kūginiai (11.30 pav., *c*); c) cilindriniai, kai *L/D* = *3...6* ir daugiau (11.30 pav., *d*).



11.30 pav. Rutulinių malūnų tipai:
a – būgninis periodinis, *b* – būgninis nuolatinis,
c – kūginis nuolatinis, *d* – cilindrinis, daugiakameris, nuolatinis

Periodiniai rutuliniai būgniniai malūnai (11.31 pav., *a*) dažniausiai naudojami tada, kai reikia smulkiai sumalti palyginti nedidelius kiekius medžiagų, neužteršiant produkto metalo priemaišomis. Šiais atvejais būgno vidus išklojamas stiprių nemetalinių medžiagų (fajanso, bazalto, granito, kvarcito ir pan.) plokštėmis. Iš jų taip pat pagaminami ir malimo kūnai (*rutuliai, cilindrai, nupjauti kūgeliai*). Pro dangčiu uždengiamą angą į būgną pakraunama iš anksto iki 1 mm dydžio trupinėlių susmulkinta medžiaga, kuri užpildo 0,3...0,35 vidinio būgno tūrio. Malimo kūnų pridedama apie *1,3 karto daugiau nei medžiagos masė* ir 3...10 val. medžiaga malama, elektros varikliui sukant būgną, kol gaunami reikiamo smulkumo milteliai.

Nuolatiniai būgniniai malūnai (11.30 pav. b), iš kurių susmulkinta medžiaga periferiškai iškraunama per sijojimo paviršius, naudojami, kai reikia rupiai sumalti didesnius vidutinio stiprio medžiagų (pvz., magnezito, išdžiovinto molio ir pan.) kiekius. Šiuose malūnuose sumontuotomis pleištinio profilio išklojomis medžiaga smulkinama daugiausia trintimi, kai patenka tarp malimo kūnų, kurie pasišokinėdami rieda pleištinių išklojų paviršiais. Per sietus perėjusios pakankamai smulkios dalelės patenka į apatinę kūginę malūno apvalkalo dalį. Šių malūnų būgno tūrio užpildymas smulkinama medžiaga

sudaro nuo 15 iki 20 %, medžiaga tiekiama į centrinę sukamo būgno dalį pro tuščiavidurį kakliuką.

Kūginiai rutuliniai malūnai (11.30 pav., *c*) naudojami įvairaus stiprumo medžiagoms malti sausuoju arba šlapiuoju būdu. Prie cilindrinės jo būgno dalies pritvirtinami du kūgiai: iš medžiagos tiekimo pusės – trumpesnis, statesnis, su 120° viršūne, o iš medžiagos iškrovimo pusės – ilgesnis, lėkštesnis, su 60° viršūne. Būgnas sumontuojamas nedideliu horizontaliu nuolydžiu (~ 0,03) ir sukamas per išorinį krumpliaratį. Į būgną prikraunama skirtingo dydžio (60...120 mm) malimo kūnų.

Sukantis būgnui, malimo kūnai savaime pasiskirsto pagal dydį: stambiausi rutuliai rieda medžiagos pakrovimo pusėje, o smulkiausi – lėkštoje kūginėje dalyje. Šitaip malimo kūnų dydžiai be pertvarų geriau suderinami su mažėjančiu dalelių dydžiu ir malimo procesas yra intensyvesnis, mažesnės smulkinimo energijos sąnaudos (palyginti su analogiško dydžio cilindriniais rutuliniais malūnais). Į šiuos malūnus pro tuščiavidurius kaklelius gali būti tiekiami iki 50 mm dydžio gabaliukai, kurie gali būti susmulkinami iki 0,07 mm dydžio dalelių.

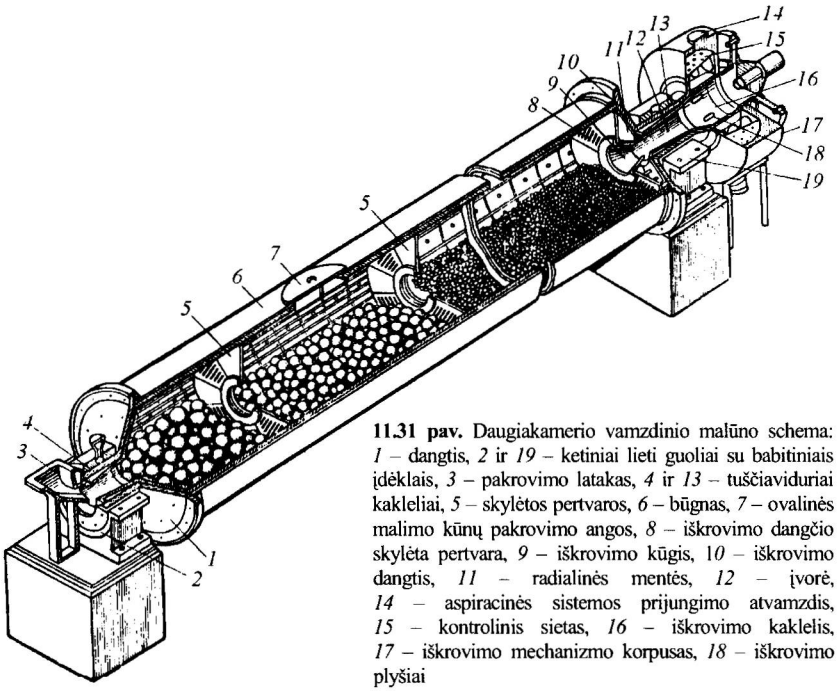
Daugiakameriai cilindriniai malūnai (11.30 pav., *d*) naudojami, kai reikia smulkiai sumalti didelius medžiagų kiekius, o gaunamas produktas turi būti labai smulkus, tolygių dalelių dydžių. Šių malūnų būgnai skylėtomis pertvaromis suskirstomi į 2...4 kameras, į kurias prikraunama skirtingo dydžio malimo kūnų (11.31 pav.). Cilindriniais malūnais gali būti malama sausuoju arba šlapiuoju būdu, atviru arba uždaru ciklu su separatoriais.

Daugiakameriai cilindriniai malūnai yra paprastos konstrukcijos, patikimi, patogūs eksploatuoti, juose nesunkiai palaikomas pastovus medžiagos susmulkinimo laipsnis, o reikalui esant, nesunku jį pakoreguoti. Į juos medžiaga, iš anksto susmulkinta iki nuo 3 iki 10 mm, tiekiama pro tuščiavidurį pakrovimo kaklelį *4*, sukantis jame įmontuotoms sraigtinėms mentelėms. Medžiaga, perėjusi per pirmąją kamerą, pripildytą stambiausių rutulių, pro skylėtą pertvarą *5* patenka į antrąją malūno kamerą. Taip išilgai būgno slenkanti medžiaga yra pamažu smulkinama. Kuo ilgesnis slinkimo kelias, tuo labiau medžiaga susmulkinama. Todėl malūnai būna gana ilgi – nuo 10 iki 15 m. Paprastai medžiaga slenka malūne apie 0,5 m/min greičiu ir malama nuo 20 iki 30 min. Malūno būgnas skylėtomis pertvaromis suskirstomas į 2, 3 arba net 4 kameras, kad skirtingo dydžio malamos medžiagos gabaliukai būtų smulkinami skirtingo dydžio malimo kūnais.

Į pirmąją malūno kamerą pakraunami 3...10 mm gabalai, kuriems suardyti reikia didelės smūgio jėgos. Todėl į ją kraunami didelio skersmens plieniniai rutuliai. Jų kinetinės smūgio energijos dydis tiesiogiai proporcingas malūno skersmeniui ir rutulio skersmeniui, pakeltam trečiuoju laipsniu. Didžiausias rutulio skersmuo apytiksliai gali būti apskaičiuotas taip:

$$d_{r\,max} = 6{,}03 \cdot \sqrt[3]{d_{m\,max}}\,; \qquad (11.78)$$

čia $d_{m\,max}$ – didžiausias į malūną kraunamos medžiagos gabaliukų dydis, mm.



11.31 pav. Daugiakamerio vamzdinio malūno schema: *1* – dangtis, *2* ir *19* – ketiniai lieti guoliai su babitiniais įdėklais, *3* – pakrovimo latakas, *4* ir *13* – tuščiaviduriai kakleliai, *5* – skylėtos pertvaros, *6* – būgnas, *7* – ovalinės malimo kūnų pakrovimo angos, *8* – iškrovimo dangčio skylėta pertvara, *9* – iškrovimo kūgis, *10* – iškrovimo dangtis, *11* – radialinės mentės, *12* – įvorė, *14* – aspiracinės sistemos prijungimo atvamzdis, *15* – kontrolinis sietas, *16* – iškrovimo kaklelis, *17* – iškrovimo mechanizmo korpusas, *18* – iškrovimo plyšiai

Į pirmąją malūno kamerą kraunami stambiausi (60...125 mm skersmens) rutuliai, kurių kiekvieno masė 0,9...8,0 kg. Į antrąją malūno kamerą patenka jau kruopelyčių pavidalo medžiaga, kuriai toliau smulkinti reikia mažesnės jėgos, bet smūgių turi būti daugiau, nes medžiagos dalelių yra daugiau negu pirmojoje kameroje. Todėl į antrąją kamerą dedami daug mažesnio skersmens (30...60 mm) rutuliai. Į tolesnes kameras patenka jau gana smulki medžiaga, todėl toliau efektyviausiai ji smulkinama trynimu, varginant paviršinį dalelių sluoksnį. Kad trynimo paviršiaus plotas būtų kuo didesnis, paskutinės kameros pripildomos plieninių cilindriukų, kurių skersmuo 16...25 mm, o ilgis 25...40 mm. Kai kuriose šalyse jos pripildomos kubelių, nupjautų kūgelių, elipsoidų bei kitokios formos malimo kūnų. Kartais paskutinė malūno kamera pripildoma mažų rutuliukų, kurių nemažai susidaro nusidėvėjus stambesniesiems. Pirmosios kameros pripildymo malimo kūnais koeficientas yra 0,35, kitų kamerų – nuo 0,25 iki 0,30.

Skylėtosios pertvaros labai padidina malūno hidraulinį pasipriešinimą, mažina jo našumą. Vietoj jų malūno vidinį paviršių galima iškloti kūginio profilio rūšiuojamųjų plokščių juostomis (slenksčiais), trukdančiomis dideliems rutuliams riedėti malūno iškrovimo galo link.

Vidutinio stiprumo uoliena (pvz., klintis) šlapiuoju būdu malama *strypiniais malūnais*, kurių malimo kūnai yra 130, 120 ir 100 mm skersmens bei 100...150 mm trumpesni už kameros ilgį strypai. Malant šiais malūnais gaunamas tolygesnio smulkumo (be stambių dalelių) malinys, malūnas dirba našiau, sunaudojama mažiau elektros energijos. Tačiau tokiais malūnais galima malti tik rupiai, galutinai medžiaga sumalama rutuliniu malūnu. Efektyviai malama, kai dvikamerio malūno pirmoji kamera pripildoma strypų, o antroji – rutulių. Malūnų su mišriais malimo kūnais našumas yra 10...20 % didesnis negu rutulinių malūnų.

Rutuliniuose malūnuose malimo kūnų masė sudaro 70...80 % visos malūne esančios masės, todėl medžiagai smulkinti tenka tik 5...10 % visų energijos sąnaudų. Apie 90 % krintančių malimo kūnų mechaninės energijos virsta šiluma, kuri sunaudojama malamai medžiagai (30...60 %) bei orui (20...50 %) pašildyti, drėgmei iš medžiagos išgarinti, spinduliavimo bei kitiems šilumos nuostoliams padengti (5...30 %). Malant šlapiuoju būdu, dėl didelės vandens šiluminės talpos išsiskyrusi šiluma malamai medžiagai nekenkia. Sausuoju būdu malamos medžiagos temperatūra gali pakilti iki 130...200 °C, todėl ji gali pradėti skilti (pvz., gipsas), o dėl to savo ruožtu intensyviau dyla išklojos plokštės ir malimo kūnai. Dėl šių priežasčių sausojo malimo malūnai turi būti tinkamai *aspiruojami*, t. y. malūno vidine ertme ventiliatoriais siurbiamas šaltas oras. Jis ne tik vėsina malūną, malamąją medžiagą bei malimo kūnus, bet kartu išneša iš malūno mažiausias daleles, todėl jos neprilimpa prie malimo kūnų. Padidinus aspiruojančiojo srauto greitį, padidėja ir malūno našumas, bet kartu padidėja hidrauliniai pasipriešinimai bei elektros energijos sąnaudos aspiracijai. Ekonomiškai naudinga, kai vienai tonai malamos medžiagos siurbiamo oro debitas būna iki 300 m^3/h. Iš malūno ištekančiame ore esti 50...200 g/m^3 gatavo produkto, tai sudaro 2...6 % malūno našumo. Kadangi siurbiant orą malūne susidaro praretinimas, tai malūnų skyriuje būna daug geresnės sanitarinės-higieninės darbo sąlygos. Iš oro srauto kietos sumaltos medžiagos dalelės išskiriamos ciklonais, ciklonų baterijomis ir rankoviniais arba elektriniais filtrais.

11.2.3. Malimo procesų optimizavimas ir intensyvinimas

Vienas iš bendriausių būdų – malimo proceso parametrų, t. y. energinio, hidrodinaminio bei fizikinio ir cheminio jų darbo režimų, optimizavimas. Norint nustatyti *optimalų energinį* malūno darbo režimą, reikia nustatyti optimalius į malūną kraunamos medžiagos gabaliukų dydžius, optimalų malūno pri-

pildymo laipsnį, optimalų malamosios medžiagos ir malimo kūnų masių santykį, parinkti tokius malimo kūnų matmenis bei vidutinį tankį ir išklojos geometrinę formą, kad iš pradžių stambesni malamosios medžiagos gabaliukai būtų smulkinami smūgiais, o susmulkėję – gniuždomi ir trinami. Stengiantis optimizuoti *hidrodinaminį* malūno darbo režimą, sudaromos tokios medžiagos judėjimo malūne sąlygos, kad skirtingose malūno zonose medžiagos kiekiai būtų optimalūs ir kad ji malūne tolygiau pasiskirstytų radialine ir ašine kryptimi. *Fizikinis ir cheminis* malūno darbo režimas optimizuojamas taip: sudaroma tokia temperatūra, drėgmė bei adsorbcinės sąlygos, kad kuo lengviau medžiaga smulkėtų, t. y. maksimaliai sumažinamas medžiagos stiprumas pradinėje malimo stadijoje ir jos agregavimasis smulkiojo malimo stadijoje.

Efektyvus yra šlapiasis medžiagų malimas: vanduo neleidžia smulkioms dalelėms agreguotis, dėl kapiliarinio slėgio mikroplyšeliuose lengviau ardomos kietosios dalelės, malūnų skyriuose būna mažiau dulkių. Vienas didžiausių šlapiojo malimo trūkumų yra tas, kad malamoji medžiaga labiau nei malant sausuoju būdu užteršiama dylančių malimo kūnų ir išklojos dalelėmis.

Malimą tiek sausuoju, tiek šlapiuoju būdu galima suintensyvinti paviršių aktyvinančių medžiagų (PAM) priedais. Šios medžiagos linkusios adsorbuotis kieto kūno paviršiuje ir migruoti medžiagos plyšeliais – taip susidaro dvimolekulis sluoksnis. Kaip ir vanduo, prasiskverbusios į malamosios medžiagos mikroplyšelius, jos sudaro papildomą kapiliarinį slėgį. Be to, malant susidarantys nauji medžiagos paviršiai adsorbuoja PAM, todėl išvengiama smulkių dalelių agregacijos. Malant su PAM priedais (0,1...0,4 % malamos medžiagos sausosios masės), malūnų našumas padidėja 20...30 % ir atitinkamai sumažėja savitosios malimo elektros energijos sąnaudos. Be to, PAM priedai padidina malamosios medžiagos takumą, todėl ji greičiau sumalama. Paviršių aktyvinančiomis medžiagomis gali būti daugelis organinių junginių: organinės riebiosios rūgštys ir jų druskos, alkoholiai, fenoliai, etanolaminai, sulfitinis mielių raugas, kai kurie silicio organiniai junginiai ir kt.

Tikslingiausia priedais intensyvinti stiprių, sunkiai sumalamų medžiagų, pvz., portlandcemenčio klinkerio, malimą. Intensyvinantieji priedai yra tuo efektyvesni, kuo dažniau medžiaga yra veikiama malimo kūnų smūgių. Kadangi panaudojus PAM sumažėja malamosios medžiagos pasipriešinimas malimui, tai, nekeičiant bendros malimo kūnų masės, galima naudoti mažesnio vidutinio tankio malimo kūnus, t. y. padidinti jų, o kartu ir smūgių, skaičių. Tačiau net nedideli PAM kiekiai gali turėti nemažai įtakos technologinėms sumaltos medžiagos savybėms (plastiškumui, hidratacijos greičiui ir pan.), todėl PAM įtaką galutinio sumalto produkto savybėms būtina ištirti bandymais.

Didinti malūnų našumą bei mažinti elektros energijos sąnaudas galima didinant jų matmenis. Dažniausiai naudojamų rutulinių malūnų našumas tiesiogiai proporcingas jų ilgiui arba santykiniam skersmens padidėjimui, pakel-

tam 2,5 laipsnio. Tobulinant rutulinių malūnų konstrukciją, dažniausiai didinamas jų skersmuo.

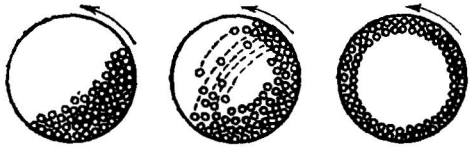
Malūnų našumas labai priklauso nuo į juos kraunamos sutrupintos medžiagos gabaliukų dydžio. Malimas yra brangesnis už trupinimą, todėl į malūnus reikia tiekti kuo smulkiau sutrupintą medžiagą. Malūnų našumas proporcingas koeficientui K, kuris priklauso nuo kraunamos medžiagos gabaliukų dydžio:

$$K = \sqrt[4]{\frac{D}{D_l}}; \qquad (11.79)$$

čia D – pradinis skaičiuojamasis kraunamų gabaliukų dydis, mm; D_l – faktinis kraunamų gabaliukų dydis, mm.

Pavyzdžiui, jei į malūną vietoj $D = 25$ mm gabaliukų bus kraunami iki $D_l = 10$ mm sutrupinti gabaliukai, jo našumas padidės: $K = \sqrt[4]{25/10} = 1{,}26$, t. y. apie 25 %. Kraunant smulkią medžiagą, kurios gabaliukai 2...3 mm dydžio (vietoj 25 mm), malūno našumas padidėja apie 30 %.

Rutulinių malūnų būgno optimalaus sukimosi dažnio nustatymas. Jeigu malūno būgnas sukamas lėtai (11.32 pav., *a*), tai dėl išcentrinės jėgos poveikio bei dėl trinties tarp malūno išklojos plokščių ir rutulių, rutuliai pakyla iki tam tikro aukščio ir nurieda žemyn. Tokiu atveju medžiaga smulkinama neefektyviai, vien trynimu.



a *b* *c*

11.32 pav. Rutulių judėjimo schemos

Padidinus būgno sukimosi dažnį, rutuliai pakyla į didesnį aukštį ir, veikiami tuo pačiu metu išcentrinės, inercijos ir sunkio jėgų, atsiskiria aukščiausiame taške nuo būgno sienelių ir, krisdami paraboline trajektorija, smūgiais smulkina apačioje esančius medžiagos gabalėlius (11.32 pav., *b*). Tačiau per daug padidinus būgno sukimosi dažnį, išcentrinė jėga padidėja tiek, kad viršija malimo kūnų – rutulių sunkio jėgą ir šie pradeda suktis kartu su būgno sienelėmis, neatlikdami smulkinimo darbo (11.32 pav., *c*).

Teoriškai nagrinėjant vieną izoliuotą rutulį veikiančių jėgų dydžius, nesunkiai įrodoma, kad mažiausias būgno sukimosi dažnis n_{kr}, aps./s, kai rutulys pradeda suktis kartu su būgnu yra

$$n_{kr} = 0{,}5 / \sqrt{R}\ ; \qquad (11.80)$$

čia R – malūno būgno vidinis spindulys, m.

Tačiau rutulinio malūno būgne yra ne vienas, o daug rutulių, todėl rutulys net lėtai sukamame būgne negali laisvai riedėti žemyn, bet yra pristabdomas žemiau esančių rutulių. Be to, vidinis būgno paviršius visada išklojamas plokštėmis su įvairaus profilio iškyšomis, kurios taip pat stabdo rutulių riedėjimą žemyn. Malimo kūnų įkrova, sukantis būgnui, išsidėsto koncentriniu sluoksniu, kurio vidiniai rutuliai išsidėsto ir juda spinduliu, mažesniu už paties būgno spindulį. Malimo įkrovos vidinis spindulys priklauso nuo būgno pripildymo malimo kūnų koeficiento φ (φ gali būti išreiškiamas malimo kūnais užpildyto būgno skerspjūvio ploto dalies santykiu su paties būgno vidinio skerspjūvio plotu, kai jis nejuda, arba atitinkamų tūrių santykiu). Įvertinus šiuos pagrindinius veiksnius buvo nustatytas sąryšis tarp būgno sukimo dažnio, jo skersmens ir pripildymo koeficiento:

$$n = 0{,}133 \cdot (5\varphi + 2) / \sqrt{D}\ . \qquad (11.81)$$

Tam, kad malimo įkrova, krisdama ilgiausia trajektorija, atliktų didžiausią darbą, kiekvieną būgno pripildymo koeficiento φ vertę turi atitikti tik viena būgno sukimosi dažnio vertė:

Būgno pripildymo koeficientas φ	0,3	0,35	0,4	0,45	0,535
Būgno sukimosi dažnis, aps./s	$\frac{0{,}466}{\sqrt{D}}$	$\frac{0{,}500}{\sqrt{D}}$	$\frac{0{,}533}{\sqrt{D}}$	$\frac{0{,}566}{\sqrt{D}}$	$\frac{0{,}620}{\sqrt{D}}$

Nustatyta, kad malimo kūnų įkrova atlieka maksimalų darbą, kai $\varphi = 0{,}45$, o būgno sukimosi dažnis $n = 0{,}566 / \sqrt{D}$.

Malant šlapiuoju būdu, dėl skysčio amortizuojamojo poveikio ir trinties koeficiento sumažėjimo būgno sukimosi dažnį reikia padidinti 10 %.

Rutulinių malūnų našumas priklauso nuo malimo būdo, malūno matmenų, kamerų skaičiaus, sukimosi dažnio, malimo kūnų masės ir formos, smulkinamos medžiagos savybių, gabalų dydžio, susmulkinimo laipsnio, pripildymo koeficiento ir kt. Įskaičiuoti visus tuos veiksnius vienoje formulėje sunku, todėl našumą geriausia nustatyti eksperimentiškai. Apytiksliai malūno našumą G_m, t/h, galima apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$G_m = \frac{L \cdot D \cdot G \cdot [10 + 0{,}35(x - 10)]}{\sigma}\ ; \qquad (11.82)$$

čia L – malūno ilgis, m; D – malūno skersmuo, m; G – malimo kūnų masė, kg; x – likutis % ant sieto Nr. 009; σ – malamos medžiagos stipris gniuždant, Pa.

Rutuliniuose malūnuose energija naudojama: a) būgnui sukti ir rutuliams pakelti, suteikiant jiems kinetinę energiją, kurios dalis sunaudojama medžiagai smulkinti; b) trinčiai tarp judamųjų dalių nugalėti ir c) paleidžiant malūną atsirandančiai inercijos jėgai nugalėti.

Rutuliniam malūnui reikalingą elektros variklio galią N, kW, galima apskaičiuoti pagal lygtį

$$N = c \cdot G \cdot \sqrt{D}\ ; \qquad (11.83)$$

čia c – koeficientas, nurodytas 11.3 lentelėje; G – malimo kūnų masė, t; D – malūno vidinis skersmuo, m.

11.3 lentelė. Koeficiento c vertės

Malimo kūnai	Malūnų pripildymo laipsnis				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Plieniniai rutuliai:					
dideli (> 60 mm)	11,9	11,0	9,9	8,5	7,0
maži (< 60 mm)	11,5	10,6	9,5	8,2	6,8
Cilpebsai	11,7	10,0	9,2	8,0	6,0

Malamosios medžiagos į malūną tiekiama tiek, kad ji ne tik užpildytų tarpus tarp malimo kūnų, bet ir padengtų juos 1 cm storio sluoksniu.

11.2.4. Suspensijų dispergavimo malūnai

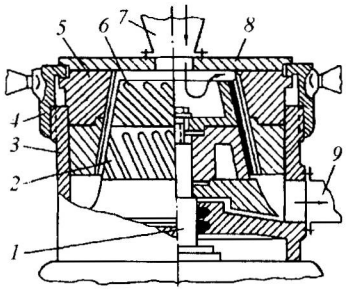
Cheminėje technologijoje naudojamos ne tik smulkios kietos medžiagos, bet ir suspensijos, kurių dalelės yra panašaus dydžio kaip ir koloidinės dalelės, t. y. mikronų ir net tūkstantųjų mikrono dalių dydžio. Iki tokio dispersiškumo daleles geriausia smulkinti vadinamaisiais *koloidiniais* malūnais: kūginiais, vibrokavitaciniais malūnais ir reaktronais. Smulkinimas šiais įrenginiais turi tam tikrų ypatumų. Medžiagos dalelės, kurios yra panašaus dydžio kaip ir koloidinės, išorinių jėgų veikiamos, sulimpa savaime arba net susipresuoja. Labai smulkiai malant, kai dalelės sumažėja iki tam tikro dydžio, nusistovi ypatinga granuliometrinės sudėties pusiausvyra: kiek smulkių dalelių susidaro suardant, tiek pat jau suardytų dalelių susijungia į agregatą. Todėl, vengiant dalelių jungimosi į agregatus, koloidiniu būdu smulkinama dispersinėje terpėje, kurioje po smulkinimo medžiagos dalelės nutolinamos viena nuo kitos tokiu atstumu, kad jų traukos jėgos būtų mažesnės už terpės pleišto poveikį. Koloidiniu būdu beveik visada smulkinama šlapiuoju būdu, o dispersinė terpė neturi tirpinti dispersinės fazės. Tam, kad koloidinio dydžio dalelės nesustambėtų ir neiškristų nuosėdomis, į dispersinę terpę dažnai pridedama elektrolitų; tada dispersinės fazės paviršiuje susidaro jonų sluoksniai ir hidratų apvalkalėliai ir šitaip koloidinė sistema stabilizuojama.

Smulkinant koloidiniu būdu kietosios ir skystosios fazių masių santykis būna nuo 1:2 iki 1:6. Skirtingai nuo tikrųjų koloidinių tirpalų, šios sistemos yra heterogeninės. Dispersinių dalelių dydis, smulkinant koloidiniais malūnais, gali sumažėti iki 0,1...0,001 mikrono (šios dalelės praeina pro filtro popieriaus poras, tačiau nepraeina pro augalų arba gyvūnų membranas).

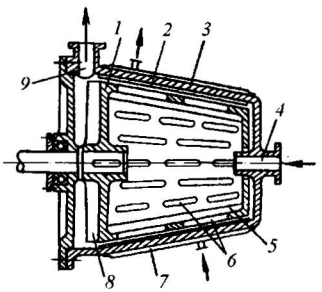
Tačiau dispersinės fazės dalelės, palyginti su dispersinės terpės molekulių dydžiu, yra tokios didelės, kad tarp kietosios ir skystosios fazių susidaro skiriamasis paviršius. Jei tokios dalelės yra apgaubtos vandeniniu apvalkalėliu ir turi elektrinį krūvį, tai jos gali ilgą laiką išlikti pakibusios, koloidinė sistema nepraranda takumo ir nevirsta zoliu arba geliu.

Koloidinio smulkinimo procesai teoriškai gana sudėtingi ir mažai ištirti, todėl kiekvienos medžiagos smulkinimo sąlygos nustatomos eksperimentiškai. Pramoniniu mastu plačiau naudojama tik keletas koloidinio smulkinimo įrenginių, dažniausiai veikiančių uždaru ciklu (cirkuliaciniais siurbliais 5...8 kartus grąžinant suspensiją smulkinti koloidiniuose malūnuose).

Kūginių koloidinių malūnų rotoriaus paviršius gali būti kūginis, ištisai rifliuotas (11.33 pav.) arba skylėtas (11.34 pav.).



11.33 pav. Kūginis koloidinis malūnas su ištisiniu sukamu kūgiu:
1 – velenas, *2* – rotorius, *3* – korpusas, *4* –jungiamoji veržlė, *5* – statoriaus žiedas, *6* – įstriži grioveliai, *7* – medžiagos tiekimo antgalis, *8* – dangtis, *9* – antgalis susmulkintai suspensijai išleisti



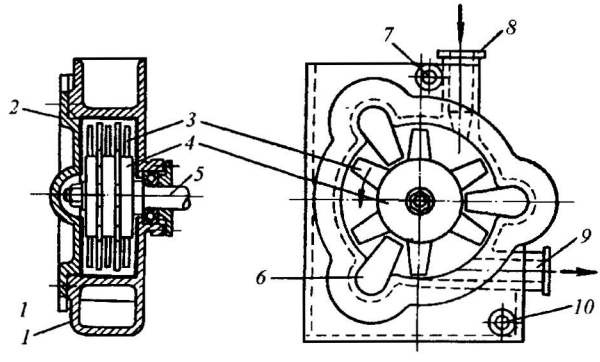
11.34 pav. Kūginis koloidinis malūnas su skylėtu kūgiu:
1 – rotorius, *2* – statorius, *3* – korpusas, *4* – suspensijos tiekimo antgalis, *5* – išilginės briaunos, *6* – kiaurymės rotoriuje, *7* – šilumokaičio apvalkalas, *8* – suspensijos iškrovimo mentelės, *9* – antgalis susmulkintai suspensijai išleisti

Pirmojo tipo koloidiniame malūne dispersinės fazės dalelės palaipsniui smulkinamos, kai juda iš viršutinės malūno dalies žemyn pro nedidelius tarpelius, susidarančius tarp nejudančio statoriaus *5* ir sukamo rotoriaus *2* žiedų darbinių paviršių. Šių žiedų paviršiuose padaromi įstriži kanalėliai *6*, kurių plotis apatiniuose žieduose mažėja, o skaičius – didėja. Rotoriaus ir statoriaus kanalėliai nukreipti į priešingas puses ir kertasi tarpusavyje. Gaunamos dis-

persinės fazės dalelių smulkumas reguliuojamas tarpelio tarp rotoriaus ir statoriaus dydžiu arba suspensijos recirkuliacijų uždaru kontūru skaičiumi. Antrojo tipo koloidinio kūginio malūno rotorius *1* yra tuščiaviduris. Smulkinama suspensija tiekiama pro tiekimo antgalį *4* ir išcentrinių jėgų poveikiu išspaudžiama pro rotoriaus plyšelius *6* į nedidelį tarpelį tarp rotoriaus ir statoriaus *2* darbinių paviršių. Statoriaus vidiniame paviršiuje smulkinimo procesui pagerinti yra išilginės briaunelės. Iš malūno suspensija pašalinama mentelėmis *8*.

Tokie koloidiniai malūnai skirti lakų, dažų, gumos, popieriaus, maisto bei chemijos pramonėje naudojamoms suspensijoms ruošti.

Koloidiniuose rotoriniuose spragiliniuose malūnuose (11.35 pav.) dispersinės fazės dalelės smulkinamos ne tik greitai (600...3000 aps./min) sukamo rotoriaus trapecijos profilio išsikišimų – spragilų smūgiais, trynimu, bet ir sudarius malūne daleles veikiantį hidraulinį kavitacijos efektą (todėl šie malūnai kartais vadinami *kavitaciniais*). Šie malūnai naudojami koloidinei sierai, grafitui, kalciui ir vario arsenitams, pigmentams ir kitoms koloidinėms sistemoms ruošti, taip pat kaip emulgatoriai, homogenizatoriai, maišytuvai ir purentuvai.



11.35 pav. Koloidinis rotorinis spragilinis malūnas: *a* – skersinis pjūvis, *b* – veikimo schema; *1* – korpusas su tuščiaviduriu šilumokaičio apvalkalu, *2* – dangtis, *3* – spragilai, *4* – rotorius, *5* – velenas, *6* – kontrspragilai, *7* ir *10* – antgaliai aušinimo arba šildymo skysčiui tiekti, *8* ir *9* – antgaliai smulkinamai suspensijai tiekti ir išleisti

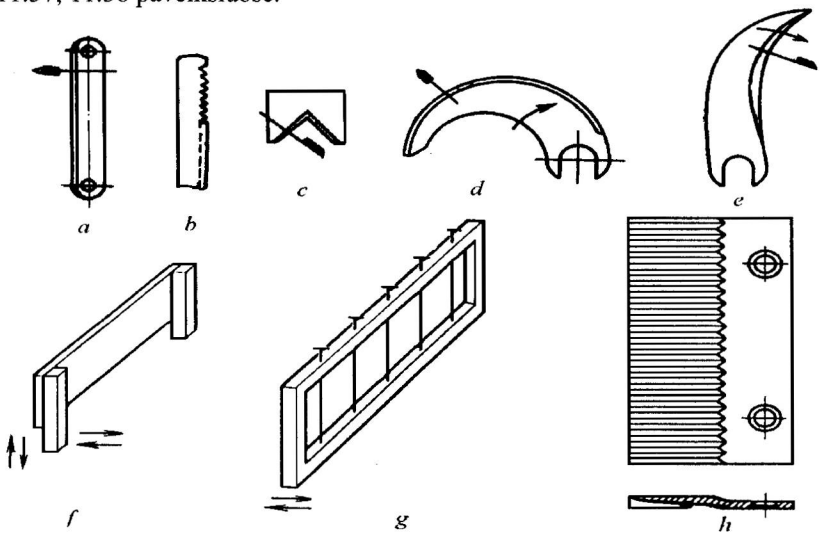
Labai panašiu principu veikia ir greitaeigiai koloidiniai smulkintuvai – reaktronai. Jie sudaryti iš 1...3 rotorių, sumontuotų ant veleno ir sukamų 3000...8000 aps./min dažniu. Rotoriuje yra dvi koncentrinės eilės pirštų, o jo centrinėje dalyje – spragilai. Reaktrono dangtyje yra trys koncentrinės eilės pirštų. Dideliu greičiu sukant rotorių, medžiagos dalelės intensyviai trinamos tarp pirštų, jas taip pat veikia didelės kavitacinės jėgos.

Vibrokavitacinio koloidinio malūno (11.29 pav., *i*) rotorius sukamas dar didesniu (~ 18000 aps./min) dažniu, todėl išilginiuose kanalėliuose judančios dalelės pradeda virpėti dažniu, artimu ultragarsiniam, ir disperguojančioje aplinkoje, veikiamos kavitacijos efekto, yra intensyviai smulkinamos.

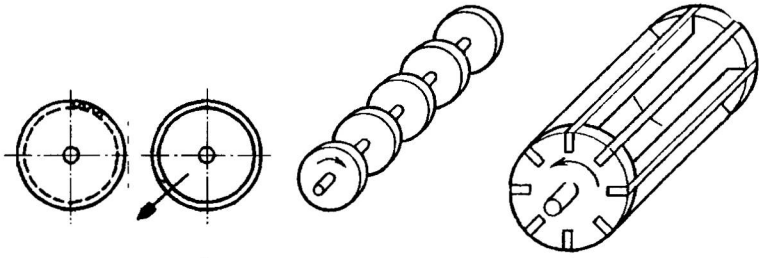
11.3. Minkštų augalinės ir gyvulinės kilmės medžiagų smulkinimo įrenginiai

Maisto pramonėje neretai tenka ne tik susmulkinti minkštas augalinės arba gyvulinės kilmės medžiagas, bet ir suteikti dalelėms reikiamą geometrinę formą (kubelių, stačiakampių gretasienių, lazdelių ir pan.). Šiais atvejais naudojami *pjaustymo įrenginiai*, kurie skirstomi į tris pagrindines grupes: 1) su sukamais *diskiniais* peiliais; 2) su *figūriniais* (pjautuvo, stačiakampio ir pan.) peiliais; 3) su *sudėtiniais pjaustymo* peiliais, pjaustančiais dviem statmenomis kryptimis.

Peilio judesys pjaustymo įrenginiuose sudaromas taip, kad peilis tuo pačiu metu būtų ne tik spaudžiamas į pjaustomą medžiagą, bet ir traukiamas arba sukamas. Pagrindiniai pjaustymo įrenginių peilių tipai pavaizduoti 11.36, 11.37, 11.38 paveiksluose.



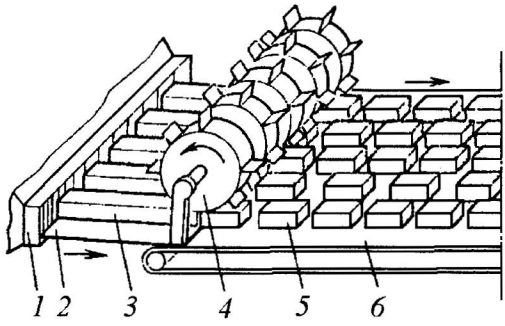
11.36 pav. Tiesinio judesio pjaustymo aparatų peiliai:
a – juostinis plokščiasis, *b* – juostinis dantytasis, *c* – plokščiasis su trikampe išpjova, *d* – pjautuvo pavidalo su išorine pjaunančiąja briauna, *e* – pjautuvo pavidalo su vidine pjaunančiąja briauna, *f* – giljotininis, *g* – rėmelis su įtemptomis vielomis, *h* – plokščiasis rifliuotasis Čižeko sistemos peilis



11.37 pav. Sukamojo judesio pjaustymo aparatų peiliai: *a* – dantytasis diskinis, *b* – plokščiasis diskinis, *c* – daugiadiskis, *d* – būgninis

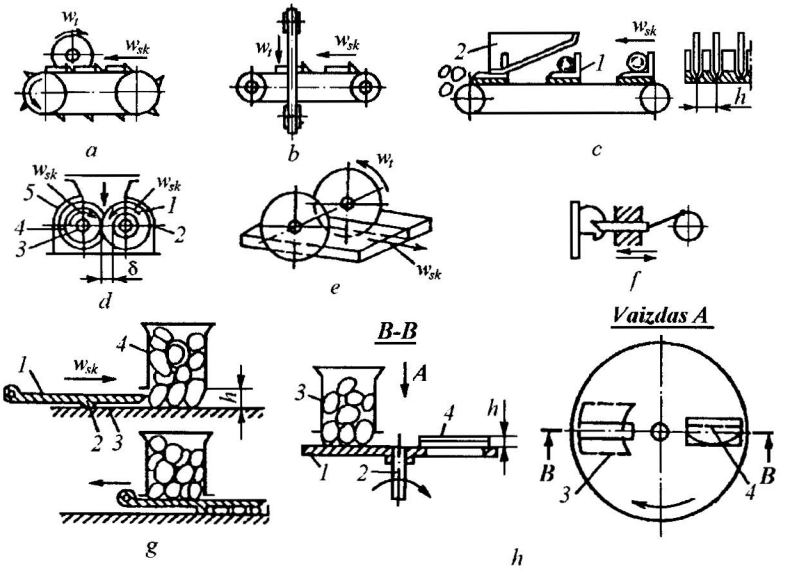
11.38 pav. Daržovių pjaustymo diskai:
a – standartinis, pjaustyti gabaliukais, *b* – minkštiems ir sultingiems produktams pjaustyti, *c* – pjaustyti banguotomis juostelėmis, *d* – pjaustyti kubeliais, *e* – trinti (tarkuoti)

Pagal peilio darbinės briaunos judesį pjaustymo metu skiriami tiesinio, diskinio (11.40 pav.) ir rotorinio arba būgninio (11.39 pav.) pjaustymo įrenginiai.



11.39 pav. Išspaustų juostelių pjaustymas sukamuoju rotoriumi su plokščiaisiais peiliais:
1 – formavimo galvutė, *2* – pjaustymo įrenginio plokštė, *3* – suformuotos juostos, *4* – rotorius su peiliais, *5* – supjaustyti pusgaminiai, *6* – juostinis transporteris

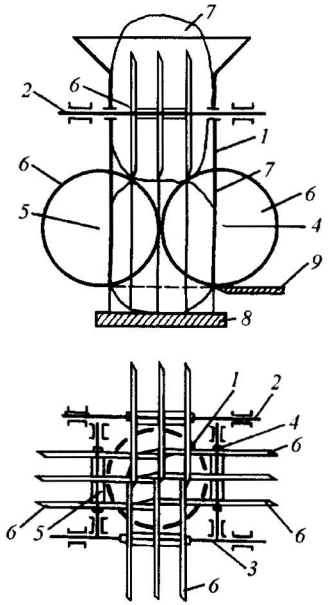
Be peilių, visuose pjaustymo įrenginiuose yra medžiagos tiekimo pjaustyti ir susmulkintos medžiagos pašalinimo mazgai. Kai kuriuose pjaustymo aparatuose peilių vaidmenį vaidina rėmeliai su įtemptomis plieninėmis vielomis. 11.40 pav. pateiktos pjaustymo aparatų schemos.



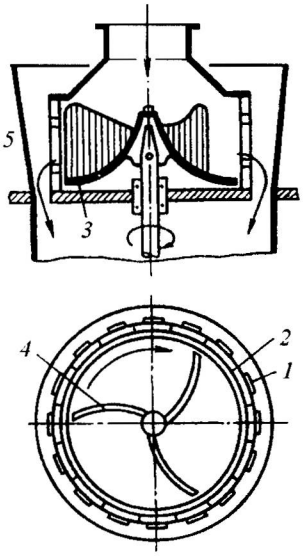
11.40 pav. Pagrindinės pjaustymo įrenginių veikimo schemos: *a*, *c* ir *e* – kai transporterio juosta su produktu slenka pastoviu greičiu, *b* – kai produktas pjaustymo metu užfiksuotas nejudamai ($w_1 >> w_2$), *d* – pjaustymas juostelėmis ir kubeliais, *f* ir *g* – pjaustymas svyruojančiaisiais peiliais, *h* – pjaustymas horizontaliuoju plokščiu diskiniu peiliu

Nejudamai įtvirtintas produktas supjaustomas kokybiškiau. 11.41 pav. pateikta pusiau automatinio pjaustymo į kubelius diskiniais peiliais schema. Cilindriniame korpuse *1* padaryta dvylika plyšelių, į kuriuos įeina diskiniai peiliai, sumontuoti ant velenų, išdėstytų skirtingose plokštumose. Velenai *2* ir *3* išsidėstę aukščiau velenų *4* ir *5*. Ant kiekvieno veleno 20 mm atstumu sumontuota po tris diskinius peilius *6*, kurie sukami vienas priešais kitą. Iš viršaus tiekiama medžiaga *7* (baklažanai, pipirai ir pan.) besisukančių peilių yra traukiama žemyn ir supjaustoma į keturias dalis, kurios įrenginio apatinėje dalyje diskiniais peiliais taip pat supjaustomos į keturias dalis statmena kryptimi. Taip supjaustytos dalys nusileidžia ant pagrindo *8* ir nupjaunamos pjautuvo pavidalo peiliu *9*; gaunami smulkinamos medžiagos kubeliai.

Išcentriniu pjaustymo įrenginiu (11.42 pav.) plonomis drožlėmis peiliais *1* supjaustomi cukriniai runkeliai ir kiti panašūs produktai. Iš viršaus ant greitai sukamo kūgio *3* nukritę produktai yra menčių *4* išcentrinių jėgų spaudžiamos prieš cilindriškai išdėstytų peilių pjaunančiąsias briauneles ir jų nupjautos drožlės bei juostelės pro tarpus tarp peilių išspaudžiamos į apatinę įrenginio dalį toliau apdoroti.



11.41 pav. Pjaustymo į kubelius schema



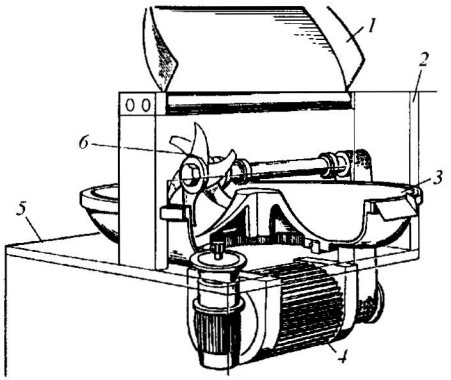
11.42 pav. Išcentrinis pjaustymo įrenginys

Mėsos smulkinimo įrenginys (11.43 pav.) sudarytas iš nerūdijančiojo plieno sukamosios lėkštės *3* ir joje įmontuoto dideliu greičiu sukamo frezos pavidalo peilio *6*.

Mėsa smulkinama vakuume, beveik be triukšmo; pjovimo greitis būna iki 130 m/s. Supjaustytos mėsos faršas periodiškai pro sklendę iškraunamas iš lėkštės ir į ją automatiškai pakraunama nauja mėsos porcija.

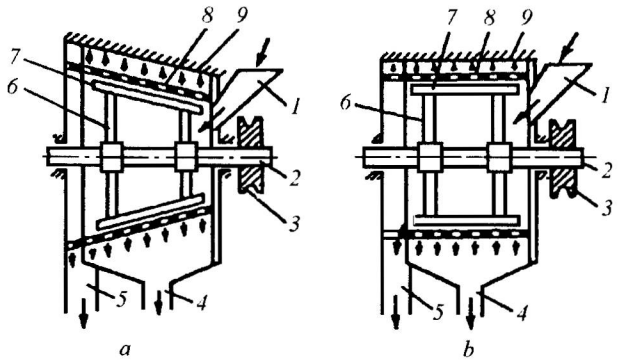
Vaisiams, daržovėms ir panašiems produktams smulkiai smulkinti taip pat naudojami *pertrynimo ir homogenizavimo* įrenginiai.

Pertrynimas – tai vaisių ir daržovių minkštimo smulkinimas kartu atskiriant iš jo kietesnes dalis: žievelę, sėkleles, kauliukus ir kt.



11.43 pav. Mėsos smulkintuvas:
1 – hermetiškas dangtis, *2* – sienelės, *3* – sukamoji lėkštė, *4* – elektros variklis, *5* – stovas, *6* – peilis

Pagrindiniai pertrynimo įrenginio (11.44 pav.) darbo mazgai yra kūginis (*a*) arba cilindrinis (*b*) tinklelis *8* ir sukamieji stumtuvai *6*, *7*. Medžiaga lataku *1* tiekiama į kūginio arba cilindrinio tinklelio vidurinę dalį, stumtuvais pro tinklelio akutes prastumta minkšta medžiaga surenkama apatinėje kūginėje dalyje ir pašalinama pro antgalį *4*. Atskirtos kietesnės stambesnės dalelės pašalinamos pro antgalį *5*.

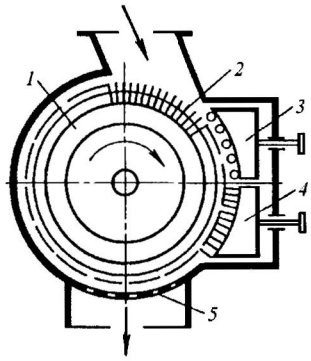


11.44 pav. Minkštų medžiagų pertrynimo įrenginiai

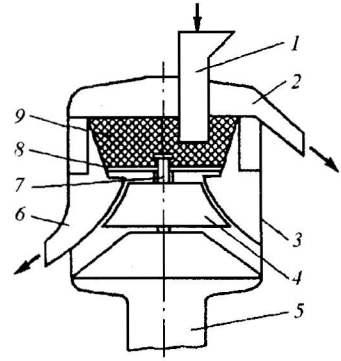
Homogenizatoriai yra skirti pertrintai skystai vaisių ir daržovių masei toliau smulkinti. Labai smulkios (iki 1 mikrono) dalelės gaunamos 15...30 MPa slėgiu ir dideliu greičiu (150...3000 m/s) prastumiant medžiagą plokščiu siauru (0,1 mm) kanalu.

Vibraciniuose homogenizatoriuose dalelės disperguojamos dėl dispersinės fazės dalelių (skysčio lašelių arba kietųjų dalelių) svyruojamųjų judesių, kurie dažniausiai sukeliami, veikiant masę ultragarsu. Ultragarsinio dažnio virpesiai susidaro, homogenizuojamos masės srautui tekant per antgalyje specialiame laikiklyje įmontuotos stangrios metalinės plokštelės suplonintą kraštelį. Į hidrodinaminį ultragarsinį homogenizatorių pertrinta masė tiekiama 1,2...2,0 MPa slėgiu; mechaniniais dalelių virpesiais užtikrinamas perdirbamo produkto vienalytiškumas.

Trintuvės (11.45 pav.) dažnai naudojamos krakmolo ir sulčių gamyboje. Jos sudarytos iš ~50 m/s greičiu sukamo dantytojo būgno *1* ir dviejų prispaudimo trinkelių *3* ir *4*, kuriomis reguliuojamas smulkinimo laipsnis. Viršutinės trinkelės *3* darbinis paviršius sudarytas iš plieninių strypelių, o apatinės trinkelės *4* – dantytas. Į viršutinę dalį tiekiama medžiaga trinama besisukančio dantytojo būgno ir galutinai susmulkinama, patekusi tarp būgno ir trinkelių. Dalelėms pakankamai susmulkinti apatinėje dalyje įtaisomas sietas *5*.



11.45 pav. Trintuvės schema



11.46 pav. Vaisių ir uogų smulkinimo mašina sulčių gamybai

Sulčių gamybai taip pat naudojamos diskinio smulkinimo mašinos, kurių darbas derinamas su sulčių atskyrimu centrifuga (11.46 pav.). Medžiaga, tiekiama lataku *1*, patenka ant besisukančios diskinės trintuvės *8*, susmulkinama ir išcentrinių jėgų yra spaudžiama prie tinklelio *9* sienelių. Išspaustos sultys nuteka į žiedinę korpuso *3* ertmę ir į lataką *6*, o išspaudos pašalinamos pro dangtelio lataką *2*. Diskinę trintuvę per rotorių *4* ir veleną *7* suka elektros variklis.

11.4. Susmulkintų medžiagų klasifikavimas

Smulkinant kietas medžiagas, retai pavyksta iš karto gauti reikiamo dydžio daleles. Dažniausiai smulkinimo produktai susideda iš įvairaus dydžio ir

įvairios formos dalelių mišinio, iš kurio reikia išskirti reikiamo dydžio frakcijas. Medžiagos suskirstymas į atskiras dalis su skirtingo dydžio dalelėmis (jos nedeformuojant) vadinamas medžiagos *klasifikacija* pagal dydį arba *rūšiavimu*. Taikomi šie rūšiavimo metodai: mechaninis, orinis arba hidraulinis, veikiant gravitacinėms ir inercinėms arba gravitacinėms ir išcentrinėms jėgoms; elektromagnetinis, elektrofizikinis; pagal dalelių tamprumą ir trinties koeficientą; pagal spalvą ir kt.

Rūšiuojama, kai reikia: 1) suskirstyti susmulkintos medžiagos daleles pagal dydį (sijojimas, orinė ir hidraulinė klasifikacija); 2) išskirti susmulkintos medžiagos daleles iš skysčio arba dujų srauto (separavimas, dulkių valymas); 3) išskirti iš susmulkintos medžiagos pašalines daleles (sodrinimas) bei kenksmingas metalines daleles (magnetinė separacija).

Cheminėje technologijoje naudojami rūšiavimo įrenginiai skirstomi taip:

1. Sijotuvai:
   a) plokštieji nejudamieji;
   b) plokštieji judamieji (vibraciniai, svyruojantieji);
   c) sukamieji (būgniniai, daugiabriauniai,diskiniai);
2. Separatoriai:
   a) oriniai (atvirojo ciklo, uždarojo ciklo);
   b) hidrauliniai klasifikatoriai (kūginiai, kameriniai, hidromechaniniai, hidrociklonai);
3. Magnetiniai separatoriai (elektromagnetiniai milteliams, elektromagnetiniai šlamui).

Susmulkintos medžiagos dalelių dydžiui nustatyti taikomi sijojimo, sedimentacinis, mikroskopinis, fotoimpulsinis, dielektrinis, konduktometrinis, televizinis, lazerinis ir kiti metodai.

Medžiagos rūšiavimas mechaniniu sietinės analizės metodu dažniausiai naudojamas, kai medžiaga susideda iš palyginti stambių (> 0,07 mm) dalelių.

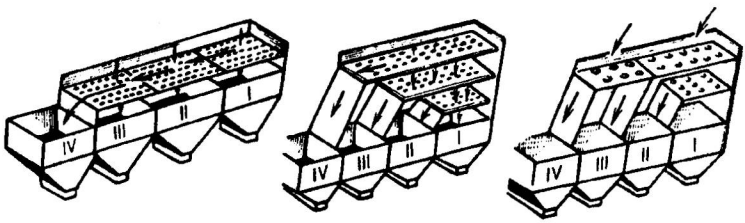
11.4.1. Sijojimas. Bendros sijojimo procesų charakteristikos

Pagal atskiriamų gabalų dydį sijojimo procesas skirstomas į:

1) *stambųjį*, kai atskiriami 200 mm ir didesni (dažniausiai iki 500 mm) medžiagų gabalai;
2) *vidutinį*, kai gabalai yra nuo 50 iki 200 mm dydžio;
3) *smulkųjį*, kai gabalai mažesni kaip 50 mm.

Gamyboje dažniausiai taikomi sijojimo būdai parodyti 11.47 paveiksle.

Pirmojo būdo pranašumai: paprasta sijotuvų konstrukcija, juos patogu prižiūrėti ir remontuoti; trūkumai: netiksliai surūšiuojama į frakcijas, stambioji frakcija labai išdildo smulkiausius sietus, ilgas sijojimo kelias, todėl reikia ilgos patalpos.



1 *2* *3*

11.47 pav. Sijojimo būdai:
1 – pirmiausia nusijojama smulkioji frakcija, *2* – pirmiausia nusijojama stambioji frakcija, *3* – medžiaga pirmiausia beriama ant vidutinio smulkumo sieto

Antrojo būdo pranašumai: tiksliai surūšiuojama į frakcijas, mažiau dyla sietai; trūkumai: sunkiau prižiūrėti, stebėti bei pakeisti sietus, sijotuvai labai aukšti, nepatogu surinkti sijojamos medžiagos frakcijas.

Trečiajam būdui būdingi abiejų pirmųjų būdų pranašumai. Medžiagos dalelės, išbyrėjusios pro sieto skylutes, vadinamos *apatinėmis klasėmis* ir žymimos ženklais „<“ arba „–“, o medžiagos dalelės, likusios ant sieto, vadinamos *viršutinėmis klasėmis* ir žymimos „>“ arba „+“.

Suskirsčius susmulkintą medžiagą sietais į atskiras klases, svarstyklėmis nustatoma kiekvienos jų masė, kuri išreiškiama procentais nuo bendros medžiagos mėginio masės. Pagal šiuos duomenis nubrėžiama medžiagos *granuliometrinės sudėties kreivė* ($d = f(\%)$), iš kurios pobūdžio aiškiai matyti, kaip yra pasiskirstę dalelių kiekiai pagal dydį. Jei kreivė išgaubta, tai vyrauja stambesnės dalelės, o jei kreivė įlinkusi (įstrižainės atžvilgiu), vyrauja smulkiausių klasių dalelės.

Rūšiavimas yra visiškai užbaigtas, kai pro sietą praeina visos dalelės, kurios yra mažesnės už sieto skylutes. Tačiau paprastai visada dalis smulkesnių dalelių lieka susimaišiusių su stambesne frakcija. Sieto *efektyvumo koeficientas* η_s, %, parodo sijojimo kokybę:

$$\eta_s = (g_1 / g) \cdot 100; \qquad (11.84)$$

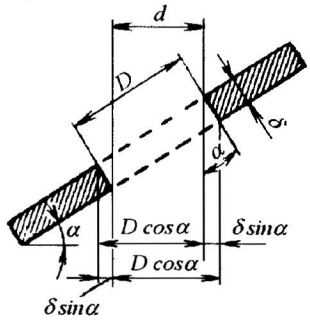
čia g_1 – dalelių, praėjusių pro sietą, kiekis; g – dalelių, galėjusių (pagal savo stambumą) praeiti pro sietą, kiekis medžiagoje.

Daugumos mechaninių sijotuvų $\eta_s = 60...70$ %; vibracinių sijotuvų η_s yra didesnis negu 90 %.

Kita svarbi sijotuvų charakteristika yra jų *savitasis našumas*. Tai sieto 1 m^2 našumas, išreikštas t/h. Jis priklauso nuo sijojamosios medžiagos sluoksnio storio ant sieto, medžiagos judėjimo greičio, jos drėgmės, dalelių formos,

sieto formos ir jo judėjimo pobūdžio. Kiekvienu atveju savitasis našumas nustatomas bandymais.

Pagrindinė sijotuvų darbo dalis yra sietai. Sijotuvų sietai dažniausia esti pasvirę, todėl sieto skylučių matmenys D turi būti didesni už praeinančių dalelių matmenis d (11.48 pav.).



11.48 pav. Pro sieto skylutę išbyrančių dalelių dydžio nustatymo schema

Pro sietą praeinančių dalelių maksimalus dydis d, m, apskaičiuojamas taip:

$$d = D \cdot cos \cdot \alpha - \delta \cdot sin\alpha ; \qquad (11.85)$$

čia α – sieto pasvirimo kampas; δ – sieto storis.

Susmulkintos medžiagos užterštumas U, %, išreiškiamas santykiu

$$U = (m - m_1) \cdot 100/m ; \qquad (11.86)$$

čia m – susmulkintos medžiagos mėginio masė, kg; m_1 – mėginio medžiagos, praėjusios pro standartinį sietą su reikiamo klasifikacijai didžiausio ribinio dydžio skylutėmis, masė, kg.

Leistinasis kiekvienos sijojamosios frakcijos užterštumas kitų klasių grūdeliais – 5 %. Todėl, jei reikia suskirstyti susmulkintą medžiagą pagal sąlyginį dalelių dydį a, tai sieto skylutės dydis D turi būti truputį didesnis už a, kad ir apatinė, ir viršutinė klasės būtų užterštos tolygiai. Sijojant sietu, kurio skylutės yra a, viršutinė klasė bus užteršta mažiau negu apatinė. Pvz., jei a = *40* mm, tai horizontalaus sieto skylutės dydis turi būti D_h = *42* mm, o pasvirojo sieto – D_p = *45* mm.

Sietai gali būti iš nejudamųjų arba judamųjų ardelių, skylėtų (štampuotų) lakštų arba pinti – metalinių bei kitos rūšies tinklelių pavidalo.

Štampuotųjų sietų skylutės paprastai būna ne mažesnės kaip 3 mm. Jos gali būti apskritos, rečiau – kvadratinės, ovalios, šešiakampės arba stačiakampės. Skylutės daromos į apačią platėjančios, kad sietai mažiau užsikimštų. Tokių sietų trūkumas – skylutės užima tik iki 50 % sieto ploto. Kad užimtų didesnį bendrą plotą, skylutės išdėstomos šachmatine tvarka.

Sietų tinkleliai gali būti supinti iš plieninės, varinės, bronzinės ir kitokios vielos, šilkinių ar kitokių siūlų. Tinklelių skylutės būna kvadratinės arba stačiakampės, jų bendras plotas sudaro iki 70 % sieto ploto. Vielinių tinklelių trūkumai: dėl nelygaus paviršiaus greičiau užsikemša ir išdyla tinkleliai, sijojant vielos gali prasiskirti. Kartais sijojama guminiais tinkleliais ir tinkleliais iš sintetinių pluoštų (polipropileno, polietileno ir kt.), nes jie daug atsparesni dilimui (15...25 kartus atsparesni už metalinius tinklelius), cheminiam medžiagų bei vandens poveikiui, neužsikemša, be to, 1,5...2 kartus lengvesni negu metaliniai. Skylučių matmenims fiksuoti bei sijojamosios medžiagos kiekiui ant sieto padidinti į polimerinius pluoštus įpinama metalinė armatūra.

Tinklelio skylučių dydis NVS sietų komplektuose nusakomas sieto numeriu: jis atitinka skylutės skersmenį (apskritų skylučių) arba mažesnės kraštinės (stačiakampių skylučių) ilgį milimetrais. Pvz., sieto Nr. 2,5 tinklelio skylučių skersmuo yra 2,5 mm, sieto Nr. 02 – 0,2 mm (11.4 lentelė).

Laboratorijose dažnai naudojami „normalinių" sietų komplektai – jų numeriai rodo skylučių skaičių viename ilgio centimetre. Visuose šio tipo sietuose skylutės pločio ir vielos storio santykis yra 3:2. Žinant sieto numerį N, skylutės plotis b_{sk}, mm, ir vielos skersmuo d_v, mm, apskaičiuojami taip:

$$b_{sk} = 6/N; \tag{11.87}$$

$$d_v = 4/N. \tag{11.88}$$

Pvz., sieto, kurio 1 cm^2 yra 1600 skylučių,

$$N = \sqrt{1600} = 40\ ;\ b_{sk} = 6/40 = 0{,}15 \text{ mm};\ d_v = 4/40 = 0{,}10 \text{ mm}.$$

Normalinių sietų numeriai yra tokie: 1, 2, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 14, 20, 30, 40, 50, 60, ..., 100.

Vokietijoje naudojamiems sietams taikoma „normalinė" klasifikacija. Anglijoje ir JAV sietai apibūdinami *mešų* skaičiumi, t. y. skylučių skaičiumi viename colyje (1 colis = 25,4 mm). Taigi apytiksliai

$$N = M/2{,}54\ ;$$

čia M – skylučių (*mešų*) skaičius colyje.

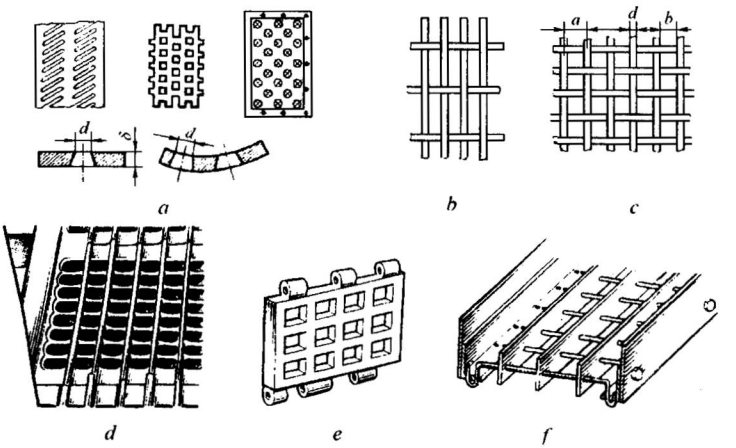
Pvz., 80 sk/colyje angliškas sietas atitinka „normalinį" sietą Nr. 30 (900 skylučių 1 cm^2): 80:2,54 = 30 arba standartinį sietą Nr. 02.

JAV naudojamos dvi colinių skalių sietų sistemos:

a) Ritingerio sietų komplekte gretimų sietų skylučių plotai skiriasi vienas nuo kito du kartus, kraštinių santykis $a/b = 1/\sqrt{2}$;

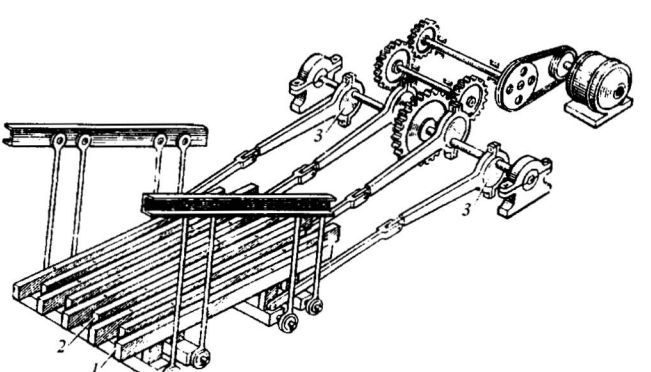
b) Ričardsono sietų komplekte gretimų sietų skylučių plotai skiriasi vienas nuo kito $\sqrt{2}$ karto, o kraštinių santykis $a/b = 1/\sqrt[4]{2}$.

Pagrindinės sijojimo schemos ir sijotuvai. Prieš pirminį trupinimą medžiaga nusijojama stambiais ardelių tipo plokščiaisiais nejudamaisiais arba judamaisiais sijotuvais. *Nejudamieji ardeliai* (11.49 pav.) įrengiami virš bunkerių, maišytuvų dėžinių tiektuvų ir kt. įrenginių.



11.49 pav. Nejudamųjų ardelių schemos: *a* – skylėtosios plokštės, *b* ir *c* – tinklai iš stiprių metalinių strypų, *d*, *e* ir *f* – metaliniai rėmai

Ardeliai gaminami iš trapecinio, pleištinio, stačiakampio arba apskrito skerspjūvio strypų arba juostų, nes turi būti labai stiprūs. Nejudamųjų ardelių trūkumas – mažas našumas, be to, sijojamą medžiagą dažnokai reikia nustumti rankiniais įrankiais (netgi kai ardeliai pasvirę 30...50° kampu).

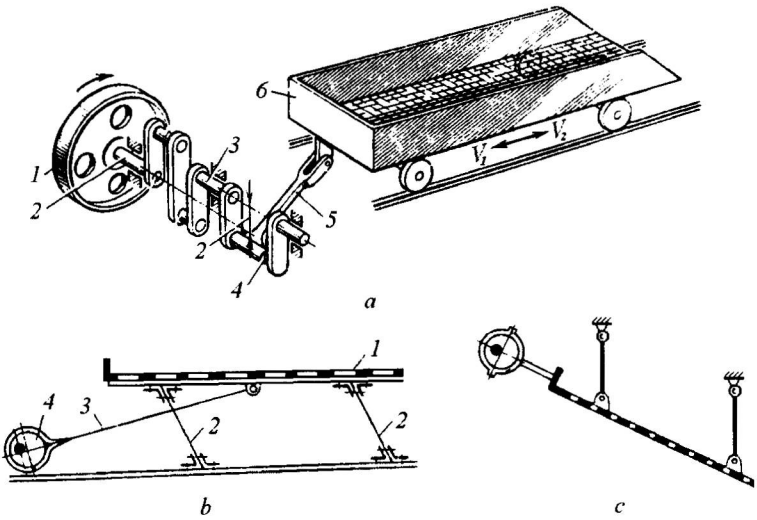


11.50 pav. Judamasis ardyninis sijotuvas: *1* – viršutiniai judamieji ardeliai, *2* – apatiniai judamieji ardeliai, *3* – ekscentrinė pavara

Judamieji plokštieji ardyniniai sijotuvai atlieka tas pačias funkcijas kaip ir nejudamieji, be to, jie dar gali dirbti kaip tiektuvai (11.50 pav.). Šių sijotuvų ardeliai *1* ir *2* juda priešingomis kryptimis, be to, ekscentrikai, kurie vienas kito atžvilgiu pasukti 180° kampu, juos kilnoja aukštyn ir žemyn. Sijotuvo, kurio ilgis 3...3,5 m, o plotis 1,5...2 m, našumas iki 150 t/h.

Svyruojančiuosiuose sijotuvuose (11.51 pav.) sietų judėjimo trajektorija nepriklauso nuo išcentrinio mechanizmo sukimosi dažnio ir nuo medžiagos, esančios ant sieto, masės; sietas virpa 30...500 virpesių per minutę dažniu.

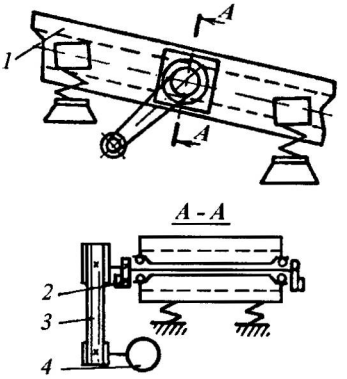
Efektyvesni yra *vibraciniai sijotuvai* (11.52, 11.53 ir 11.54 pav.). Jais medžiagos rūšiuojamos tiek sausuoju, tiek ir šlapiuoju būdu. Sijojamoji medžiaga susisluoksniuoja, smulkesnės dalelės atsiduria apačioje, po stambiosiomis, todėl pagerėja sijojimo kokybė (η_s = 90 %), padidėja sijotuvų našumas, sumažėja elektros energijos sąnaudos.



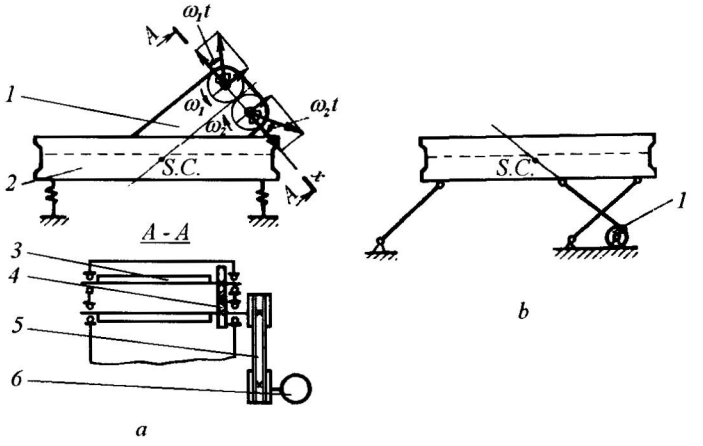
11.51 pav. Plokščiųjų sijotuvų principinės veikimo schemos:
a – su asimetriniu švytavimo mechanizmu ($v_1 > v_2$): *1* – diržinės pavaros skriemulys, *2* – varantysis velenas, *3* – vidurinis velenas, *4* – švaistiklio velenas, *5* – švaistiklio trauklė, *6* – sijotuvo sietas; *b*, *c* – su simetriniais švytavimo mechanizmais: *1* – plokščiasis sietas, *2* – šarnyriškai įtvirtinta traukė, *3* – ekscentriko trauklė, *4* – ekscentrinis varantysis velenas

Vibracinių sijotuvų sieto švytavimo amplitudė priklauso nuo inercijos jėgos dydžio, ant sieto subertos medžiagos masės, spyruoklių standumo. Vibracinių sijotuvų sietai virpa 800...3000 virpesių per minutę dažniu, svyravimų amplitudė – 0,5...25 mm. Vibraciniai sijotuvai gali būti mechaniniai arba elek-

tromagnetiniai. Mechaniniai vibraciniai sijotuvai skirstomi į ekscentrinius ir inercinius. Ekscentrinių vibracinių sijotuvų (11.52 pav.) rėmas su sietu virpa pastoviu dažniu bei amplitude; virpesius sužadina varančiojo veleno ekscentrikas. Vibratoriai juose įrengti rėmo svorio centre, o rėmas su horizontale sudaro 15...25° kampą.



11.52 pav. Nuožulniojo vibracinio ekscentrinio sijotuvo principinė veikimo schema: *1* – rėmas su sietu, *2* – ekscentrinis velenas, *3* – diržinė pavara, *4* – elektros variklis

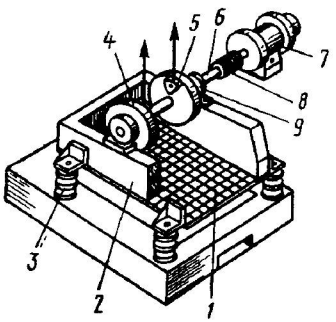


11.53 pav. Horizontaliojo vibracinio sijotuvo principinės veikimo schemos: *a* – su dviem nesubalansuotais velenais, *b* – su vienu nesubalansuotu velenu; *1* – vibravimo mechanizmas, *2* – rėmas su sietu, *3* – nesubalansuotas velenas, *4* – krumpliaratinė pavara, *5* – diržinė pavara, *6* – elektros variklis, *S.C.* – svorio centras

Horizontaliaisiais vibraciniais sijotuvais (11.53 pav.) sijojama daug efektyviau negu nuožulniaisiais. Šių vibracinių sijotuvų vibratorių sudaro du nesubalansuoti velenai, sujungti krumpliaratine pavara. Nesubalansuoti velenai sinchroniškai sukasi priešingomis kryptimis, todėl jų kampiniai greičiai bet kuriuo laiko momentu yra lygūs, t. y. $\omega_1 \cdot t = \omega_2 \cdot t$.

Išcentrinės jėgos projekcijos x ašyje yra lygios, bet priešingų krypčių, o y ašyje – tos pačios krypties, taigi sumuojasi, todėl sijotuvo rėmas vibruoja. Horizontaliųjų vibracinių sijotuvų vibravimo mechanizmas daug sudėtingesnis negu nuožulniųjų, todėl horizontalieji vibraciniai sijotuvai naudojami tada, kai sijoti reikia labai efektyviai arba kai sijojimo patalpa yra nepakankamai aukšta. Horizontalieji vibraciniai sijotuvai dažnai naudojami kilnojamuosiuose trupinimo ir rūšiavimo agregatuose.

Inerciniams vibraciniams sijotuvams (11.54 pav.) būdinga tai, kad sietų virpėjimo amplitudė yra nepastovi, ji priklauso nuo medžiagos kiekio ant sieto. Nesubalansuotas velenas sukasi ne tik apie savo ašį, bet ir apie ašį, einančią per visos judamosios sistemos masės centrą, taigi jo padėtis priklauso ir nuo sijojamos medžiagos, patenkančios ant sieto, masės. Dėl šios priežasties nesubalansuotas velenas sukasi elipsės trajektorija.



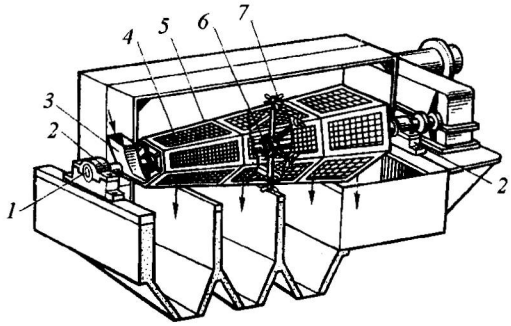
11.54 pav. Inercinis vibracinis sijotuvas:
1 – sietas, *2* – nuožulnusis rėmas, *3* – cilindriniai spyruokliniai laikikliai, *4* – diskai su nesubalansuotomis masėmis, *5*, *6* – velenai, *7* – elektros variklis, *8* – elastinga jungiamoji pavara, *9* – guoliai

Tokia pat trajektorija sukasi ir visi prie jo pritvirtinti mazgai, tarp jų ir diržinės pavaros skriemulys, todėl diržinė pavara blogiau dirba. Inercinių sijotuvų judamasis rėmas su horizontale sudaro 15...30° kampą. Inercinių sijotuvų konstrukcija yra nesudėtinga, jais dažniausiai rūšiuojamos 0,2...2,0 mm dydžio dalelės. Analogiškos konstrukcijos yra dviejų sietų nuožulnieji inerciniai vibraciniai sijotuvai, tik juose vietoj amortizacinių spyruoklinių laikiklių įrengti pneumatiniai balioniniai amortizatoriai neigiamam rezonansinių ap-

krovų poveikiui mažinti. Inercinių vibracinių sijotuvų našumas 40...50 m^3/h, ekscentrinių vibracinių – 200...250 m^3/h.

Elektromagnetiniuose vibraciniuose sijotuvuose elektromagneto inkaras sujungiamas su sietu. Sijotuvas jungiamas į kintamosios elektros srovės tinklą, todėl sietas svyruoja 30 Hz (1800 virp./min) dažniu. Sietas montuojamas 25...40° kampu. Šie sijotuvai naudojami retai, nes reikalingas generatorius.

Sukamaisiais sijotuvais (11.55 pav.) į frakcijas skirstomas maltas kvarcas, šamotas, molis arba kitos smulkiai sutrupintos medžiagos. Juose sukamas sietų arba grotelių rinkinys gali būti nuožulnaus cilindro, nupjauto kūgio arba briaunoto daugiakampio formos.



11.55 pav. Sukamasis daugiabriaunis sijotuvas (buratas):
1 – velenas, *2* – guoliai, *3* – medžiagos tiekimo latakas, *4* – sietas, *5* – rėmas, *6* – sietų tvirtinimo įvorės su kryžmėmis ir ąselėmis, *7* – sietai

Pagrindinis sukamųjų sijotuvų pranašumas yra tas, kad jie sukasi lėtai, tolygiai, be smūgių ir kratymų, todėl juos galima montuoti viršutiniuose pastatų aukštuose ir virš bunkerių. Tokių sijotuvų konstrukcija labai paprasta. Sukamuosiuose sijotuvuose pirmiausia atskiriamos smulkiausios, po to vidutinės ir stambiausios dalelės. Virš smulkiausio sieto kartais įrengiamas apsauginis – stipresnis sietas, ant kurio krinta sijojamoji medžiaga, todėl apsaugomas smulkusis sietas. Sijotuvas dirba normaliai, kai sieto kampinis sukimosi greitis ω, rad/s,

$$\omega = \frac{0{,}84...1{,}47}{\sqrt{R}},$$

arba apskritiminis linijinio sukimosi greitis n, m/s,

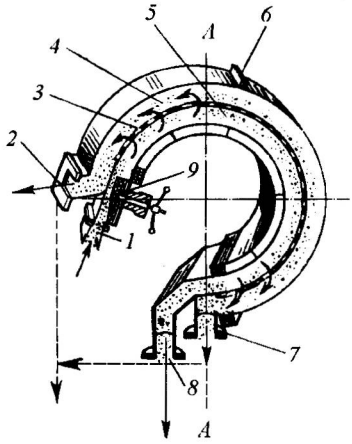
$$n = \frac{8...14}{\sqrt{R}}.$$

Dažniausiai sietų periferinis apskritiminis sukimosi greitis $v = 0,7...1,0$ m/s, našumas 1...1,5 t/h.

Sukamųjų sijotuvų trūkumai: mažas sietų naudingumo koeficientas (45...60 %), nes panaudojama tik nedidelė dalis (1/6...1/8) bendro sieto paviršiaus, sijotuvai dideli ir sunkūs, sudėtinga būgninio sieto gamyba, mažas našumas (2...3 t/h).

Šio sijotuvo pranašumai: nėra judančių dalių, todėl jis mažiau dyla, paprasta priežiūra, didesnis 1 m^2 sieto paviršiaus našumas, palyginti nedideli matmenys ir nedidelės metalo sąnaudos, tolygi gatavo produkto granuliometrinė sudėtis.

Malamoms medžiagoms šlapiai rūšiuoti (košti) vis dažniau naudojami *lankiniai sijotuvai* (11.56 pav.).



11.56 pav. Lankinis sijotuvas:
1 – šlamo tiekimo antgalis, *2* ir *7* – smulkaus produkto išleidimo atvamzdžiai, *3* – sietas, *4* – ertmė virš sieto, *5* – ertmė po sietu, *6* – korpusas, *8* – rupaus šlamo grąžinimo atvamzdis, *9* – sklendė

Šie sijotuvai ypač efektyvūs, kai žaliavų malūnai dirba uždaruoju ciklu. Košiamoji suspensija, kurios drėgmė $W = 32...39$ %, į sijotuvą tiekiama 0,1...02 MPa slėgiu lanko pavidalo sieto liestinės kryptimi pro antgalį *1* ir sklendę *9*, kuria galima reguliuoti suspensijos srauto greitį (6...9 m/s). Suspensijos kietosios dalelės, veikiamos išcentrinės jėgos, slenka į viršų, sieto link. Smulkioji frakcija, kurios dalelių matmenys 1,5...2 kartus mažesni už sieto skylučių plotį, praeina pro sietą, ir gatavas produktas, gautas iki linijos *A–A*, išleidžiamas pro atvamzdį *2*. Likusi suspensijos dalis toliau rūšiuojama už linijos *A–A*: pakankamai smulkios dalelės praeina pro sietą ir išleidžiamos per

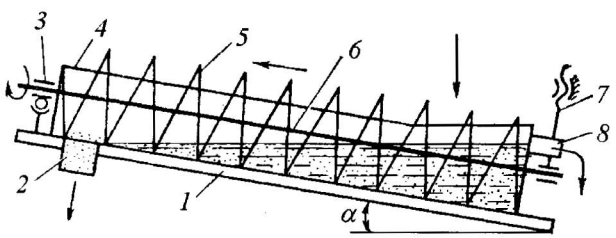
atvamzdį *7*, o per rupiai sumalta suspensija pro atvamzdį *8* grąžinama į malūną ir smulkinama papildomai.

Malant žaliavas uždarojo ciklo malūnu ir jas separuojant lankiniu sijotuvu, bendras įrenginio našumas būna 40 % didesnis, o savitosios energijos sąnaudos 1 t produkto 30 % mažesnės negu malant tuo pačiu malūnu atviruoju ciklu.

11.4.2. Hidraulinė klasifikacija

Hidraulinė klasifikacija taikoma tada, kai medžiagos daleles reikia ne tik suskirstyti pagal stambumą, bet ir jas išplauti bei atskirti kenksmingas priemaišas. Klasifikatoriai būna *mechaniniai, hidrauliniai ir iščentriniai.*

Mechaniniuose klasifikatoriuose (11.57 pav.) smėlio suspensija lovyje mechaniškai maišoma, ir smulkiausios pašalinių medžiagų, pvz., molio mineralų, dalelės kartu su vandeniu pašalinamos pro išleidimo atvamzdį *8*. Stambesnės išplautos smėlio dalelės sėda ant dugno ir sraigtiniu transporteriu stumiamos per iškrovimo lataką *2*.

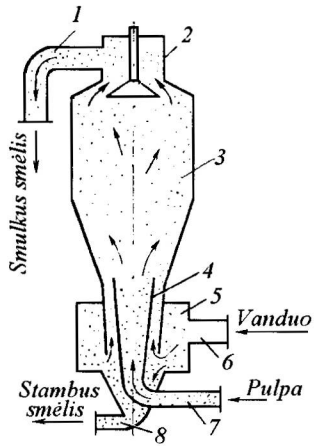


11.57 pav. Spiralinis klasifikatorius: *1* – rėmas, *2* – kietųjų dalelių iškrovimo latakas, *3* – guolio atrama, *4* – lovys, *5* – sraigtas, *6* – velenas, *7* – sraigto kilnojimo mechanizmas, *8* – atvamzdis nešvariam vandeniui išleisti

Spiraliniai klasifikatoriai gali būti su vienu arba su dviem sraigtiniais transporteriais, sraigtų skersmuo 750...15000 mm, jų sukimosi dažnis 0,085...0,43 rad/s, lovio posvyrio kampas $\alpha = 10...25°$. Sraigtinių klasifikatorių našumas – iki 2000 t/h. Smėlio klasifikavimo efektyvumas ne didesnis kaip 70 %. Tokiais klasifikatoriais iš smėlio pašalinamos labai smulkios dalelės (mažesnės kaip 0,15 mm). Sodrinto smėlio drėgnis – apie 18...20 %.

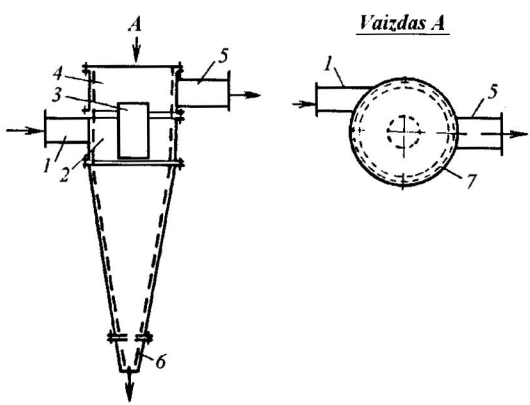
Į vertikalųjį hidraulinį klasifikatorių (11.58 pav.) pulpa leidžiama pro apatinį atvamzdį *7*. Ji patenka į skirstomąją kamerą *3*, į kurią iš apačios leidžiamas vanduo.

Smulkiosios frakcijos dalelės, kurių sėdimo greitis mažesnis už į viršų kylančio vandens srauto greitį, išnešamos iš klasifikatoriaus pro atvamzdį *1*. Stambesnės dalelės nusėda klasifikavimo kameros *5* apatinėje dalyje ir pašalinamos pro atvamzdį *8*. Tokių klasifikatorių našumas – iki 4000 m^3/h disperguotos fazės, klasifikavimo efektyvumas – 75...90 %.



11.58 pav. Vertikalusis hidraulinis klasifikatorius:
1 – atvamzdis smulkiajai frakcijai išleisti, *2* – kolektorius, *3* – skirstomoji kamera, *4* – difuzorius, *5* – klasifikavimo kamera, *6* – vandens tiekimo atvamzdis, *7* – atvamzdis smėlio pulpai tiekti, *8* – atvamzdis stambiajai frakcijai išleisti

Išcentriniai hidrauliniai klasifikatoriai (hidrociklonai ir centrifugos) naudojami 5...500 μm skersmens dalelėms suskirstyti. Hidrociklonas (11.59 pav.) – tai cilindras *2*, iš vidaus išklotas dilimui atsparia iškloja; apatinė jo dalis kūginė.



11.59 pav. Hidrociklonas:
1 – vamzdis klasifikuojamajai suspensijai tiekti, 2 – cilindrinė ciklono dalis, 3 – vidinis vamzdis, 4 – viršutinė ciklono kamera, 5 – vamzdis smulkių dalelių suspensijai išleisti, 6 – antgalis stambių dalelių suspensijai išleisti, 7 – dilimui atspari iškloja ir guminis tarpsluoksnis

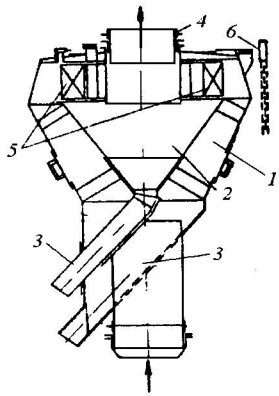
Klasifikuojamoji suspensija leidžiama $(0,3...1,8)\cdot 10^5$ Pa slėgiu liestinės kryptimi į hidrociklono vidurinę dalį. Stambiosios suspensijos dalelės išcentrinių jėgų yra spaudžiamos prie hidrociklono sienelės. Dėl trinties praradusios greitį, jos slysta kūgio paviršiumi į apatinę hidrociklono dalį.

Smulkiosios dalelės kartu su vandeniu kyla į viršų ir pro vamzdžius *3* ir *5* išnešamos iš hidrociklono.

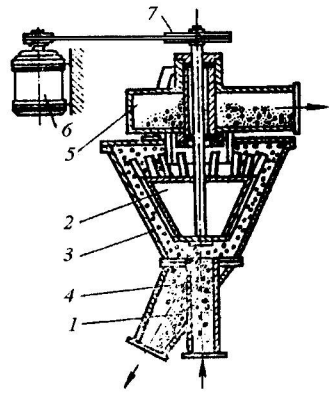
11.4.3. Orinė susmulkintų dalelių separacija

Malinio suskirstymas į smulkiąją bei rupiąją frakcijas vadinamas separacija, o aparatai – separatoriais. Susmulkinta medžiaga iš malūno į separatorių gali būti tiekiama dviem būdais: 1) *mechaniniu* – kaušiniais elevatoriais; 2) *pneumatiniu* – per malūną siurbiamo oro srautu. Šiais dviem atvejais separacijai naudojami skirtingų tipų separatoriai – uždarojo arba atvirojo ciklo.

Atvirojo ciklo separatoriai (11.60 ir 11.61 pav.) naudojami, kai žaliavų malimas derinamas su jų džiovinimu karštų dujų sraute.



11.60 pav. Atvirojo ciklo separatoriaus su reguliuojamomis kreipiamosiomis mentėmis schema: *1* – išorinis kūgis, *2* – vidinis kūgis, *3* – rupaus produkto atvamzdis, *4* – smulkaus produkto atvamzdis, *5* – kreipiamosios mentės, *6* – menčių kampo reguliavimo įtaisas

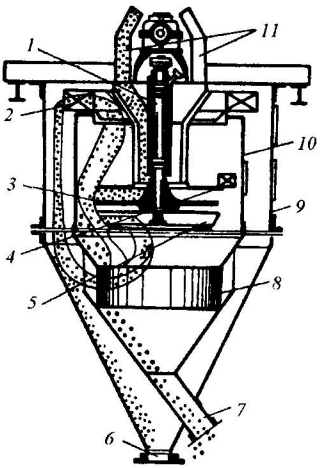


11.61 pav. Atvirojo ciklo separatorius su sukamomis kreipiamosiomis mentėmis: *1* – klasifikuojamo mišinio tiekimo atvamzdis, *2* – vidinis sukamasis kūgis, *3* – išorinis kūgis, *4* – rupaus produkto atvamzdis, 5 – smulkaus produkto atvamzdis, *6* – elektros variklis, *7* – vidinio kūgio su tiesiomis mentėmis sukimo skriemulys

Šie separatoriai būna iki 6 m skersmens. Juose dulkėto oro srautas staigiai išsiplečia apatinėje kūgio dalyje, be to, yra veikiamas nejudamų arba sukamų kreipiamųjų menčių, todėl susidaro jo sūkuriai. Išcentrinės jėgos bloškia stambesnes srauto daleles prie kūgių sienelių, todėl jos netenka greičio ir sienelėmis šliaužia į rupaus produkto atvamzdį. Smulkiosios dalelės

(<0,001 mm) kartu su karštų dujų srautu išnešamos iš separatoriaus ir nusodinamos ciklonuose bei elektriniuose filtruose.

Derinant drėgnų žaliavų malimo agregatus su atvirojo ciklo separatoriais, džiovinimui galima naudoti palyginti neaukštos temperatūros iš sukamųjų krosnių bei aušintuvų ištekančias dujas. Malūnuose su atvirojo ciklo separatoriais geriau panaudojama ištekančių dujų šiluma, mažesnės kapitalinės investicijos, geresnės eksploatacijos sąlygos negu malūnuose su uždarojo ciklo separatoriais. Tačiau per tokius malūnus reikia prasiurbti daug ($2 \cdot 10^4 ... 3 \cdot 10^4$ m^3/h) džiovinimo dujų, todėl sunaudojama daug elektros energijos. Malūnai su uždarojo ciklo separatoriais, t. y. kai malamoji medžiaga nuo malūno iki separatoriaus transportuojama mechaniniais įrenginiais, vienai tonai medžiagos sumalti sunaudoja 14,5...18 MJ energijos mažiau. Dėl šios priežasties malimo agregatai dažniausiai yra derinami su uždarojo ciklo separatoriais (11.62 pav.).



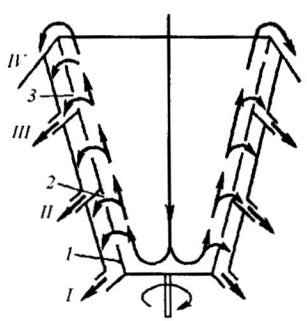
11.62 pav. Uždarojo ciklo separatorius:
1 – velenas, *2* – ventiliatoriaus mentės, *3* – skirstomasis diskas, *4*, *5* – disko mentelės, *6* – smulkaus produkto atvamzdis, *7* – rupaus produkto atvamzdis, *8* – žaliuzės mentelės, *9* – išorinis kūgis, *10* – vidinis kūgis, *11* – tiekiamo produkto atvamzdžiai

Medžiaga iš malūno kaušiniu elevatoriumi perkeliama į uždarojo ciklo separatorių. Jame ventiliatorius, skirtas uždaram oro srautui sudaryti, dulkių ir oro maišytuvas bei stambių ir smulkių dalelių skyriklis yra sujungti į vieną agregatą. Sukantis ventiliatoriaus *2* bei skirstomojo disko mentelėms *4* ir *5*, sudaromas vertikalus uždaras oro ir dulkių srautas. Vidutinės ir stambios dalelės, atsitrenkusios į vidinio būgno sieneles ir praradusios greitį, slenka žemyn per žaliuzių menteles *8* į rupaus produkto atvamzdį *7*. Oro srautas, judėdamas

uždaru ciklu ir grįždamas aukštyn per žaliuzių menteles, nupučia nuo jų smulkias daleles, atsitiktinai patekusias tarp rupaus produkto dalelių. Smulkios dalelės dėl oro praretinimo apatinėje separatoriaus dalyje praranda greitį ir, atsitrenkusios į kūgio sieneles, išbyra pro atvamzdį *6*.

Atskiriamos smulkiosios frakcijos dispersiškumą galima reguliuoti keičiant mentelių *4* padėtį radialine kryptimi arba mažinant mentelių skaičių. Uždarojo ciklo separatorių skersmuo 2,8...5 m, jų savitosios elektros energijos sąnaudos 1,35...1,90 kW·h/t. Uždarojo ciklo cemento malūnai veikia kartu tik su uždarojo ciklo separatoriais.

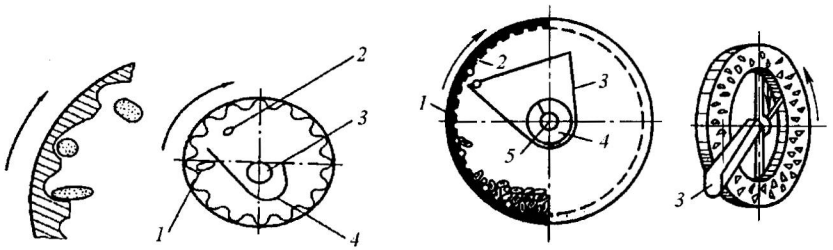
Grūdelių pavidalo medžiagos į frakcijas pagal grūdelių dydį gali būti suskirstomos ir kūginiais išcentriniais skylėtaisiais separatoriais (11.63 pav.). Grūdelių mišinys, tiekiamas į apatinę sukamo tuščiavidurio kūgio *1* dalį, išcentrinių jėgų yra spaudžiamas prie jo sienelių ir jomis kyla į viršų. Didesnės masės ir dydžio dalelės pakyla į didesnį aukštį ir išbyra pro aukščiau esančias skylutes *2* ir *3*; šitaip mišinio daleles pagal dydį suskirstomos į frakcijas I, II, III ir IV. Išcentrinės jėgos poveikiu taip pat yra pagrįstas cilindrinių ir diskinių trėjerių veikimas (11.64 pav., *a*, *b* ir *c*).



11.63 pav. Kūginio išcentrinio skylėto separatoriaus schema

11.4.4. Trejeriai

Trėjeriai naudojami mažesnio ilgio grūdeliams (puselėms) išskirti iš tokio pat skersmens grūdelių mišinio. Greitaeigis ($n \approx 45$ aps./min) *būgninis trėjeris* (11.64 pav., *b*) sudarytas iš tuščiavidurio būgno *1*, sumontuoto ant veleno *5*, kuris kartu yra ir sraigtinio transporterio *4* velenas. Vidiniame būgno paviršiuje padaromos pusapskritimio arba elipsės formos įdubos, į kurias, sukantis būgnui, įkrinta grūdeliai.



11.64 pav. Bendra trejerių veikimo schema (*a*); būgninio (*b*) ir diskinio (*c*) trejerių schemos

Smulkesni, trumpesni grūdeliai įkrinta giliau, todėl jie yra sukamo būgno pakeliami aukščiau ir iškrinta į laisvai ant veleno *5* pritvirtintą piltuvą *3*, iš kurio nukrinta ant sraigtinio atliekų šalinimo iš būgno transporterio. Ilgi, sveiki grūdeliai iškrinta iš įdubimų anksčiau ir rieda būgnu link iškrovimo latako. Greitaeigių trejerių būgno darbinis sukimosi dažnis nustatomas iš lygties

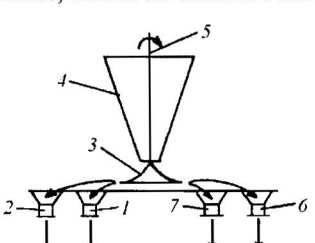
$$n_d = 24 / \sqrt{R}\ ; \qquad (11.89)$$

čia R – trėjerio būgno vidinis spindulys, m.

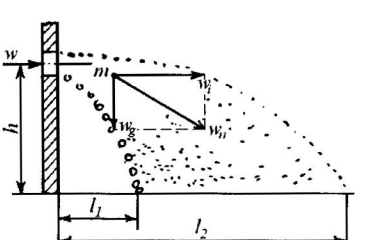
Diskinis trejeris (11.64 pav., *c*) sudarytas iš diskų, kurių paviršiuose padarytos duobutės; jų pakelti trumpi grūdeliai išbyra į lovelį *3*.

11.4.5. Inercinė-gravitacinė separacija

Prie išcentrinių separatorių taip pat priskiriami *diskiniai separatoriai* (11.65 pav.). Juos sudaro bunkeris *4*, iš kurio klasifikuojamoji medžiaga dozėmis tiekiama ant veleno *5* sukamo kūginio disko *3* paviršiaus. Besisukančio disko išcentrinių jėgų veikiamos stambesnės, didesnės masės dalelės nusviedžiamos toliau ir nukrinta į toliau esančius kūginius surinktuvus *2* ir *6* nei smulkesnės, kurios surenkamos rinktuvuose *1* ir *7*.



11.65 pav. Diskinis separatorius



11.66 pav. Inercinės-gravitacinės separacijos principinė schema

Susmulkintos medžiagos į frakcijas gali būti rūšiuojamos ir inercinių-gravitacinių jėgų poveikiu (11.66 pav.). Bet kuri susmulkintos medžiagos dalelė, kartu su greičiu w judančiu dujų arba skysčio srautu patekusi į separatorių, tuo pačiu metu bus veikiama dviejų jėgų: *inercijos* (dėl kurios ji judės greičiu w_i horizontalia kryptimi) ir *gravitacinės* sunkio jėgos (dėl kurios ji judės greičiu w_g). Jei srauto greitis w pastovus, tai dalelė, veikiama šių jėgų, juda separatoriuje parabolės trajektorija greičiu w_n ir tada

$$h/w_g = l/w_i . \qquad (11.90)$$

Nusėdant dalelei laminarinio pobūdžio sraute,

$$w_g = d^2 \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot g/(18 \cdot \mu);$$

čia d – dalelės skersmuo, mm; ρ_1 – dalelės tankis, kg/m^3; ρ_2 – terpės tankis, kg/m^3, μ – terpės dinaminės klampos koeficientas, Pa·s.

Įrašę šią w_g išraišką į (11.90) lygtį, gauname separatoriuje dalelės nueito kelio ilgio l lygtį:

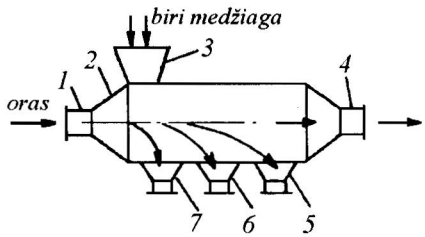
$$l = 18 \cdot \mu \cdot h \cdot w_i/[(\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot d^2]. \qquad (11.91)$$

Kadangi w_i, h, μ, g, ρ_1, ρ_2 yra pastovūs srauto dydžiai, tai

$$l = k/d^2. \qquad (11.92)$$

Iš (11.92) lygties galima padaryti išvadą, kad dalelės nueitas kelias, kol ji pasiekia separatoriaus pagrindą, yra atvirkščiai proporcingas jos skersmeniui, pakeltam antruoju laipsniu. Kuo dalelės stambesnės, tuo arčiau nuo įėjimo į separatorių taško jos iškris iš srauto. Iš 11.66 pav. taip pat matome, kad, kuo didesnis aukštis h, tuo didesnis skirtumas $l_2 - l_1$ ir tuo geriau išsiskirstys medžiagos dalelės pagal dydį.

Jei gatavą produktą turi sudaryti frakcija nuo $+d_1$ iki $-d_2$, tai dalelės turi būti surenkamos atstumu $l_2 ... l_1$, kai $l_1 = k/d_1^2$ ir $l_2 = k/d_2^2$.



11.67 pav. Vėtyklės schema:
1 – oro tiekimo antgalis, *2* – korpusas, *3* – birios medžiagos bunkeris, *4* – antgalis orui su lengvomis frakcijomis išleisti, *5*, *6*, ir *7* – frakcijų bunkeriai

Praktiškai tokie patys dėsningumai išlieka ir tais atvejais, kai srautas separatoriuje netenka greičio arba keičia judėjimo kryptį.

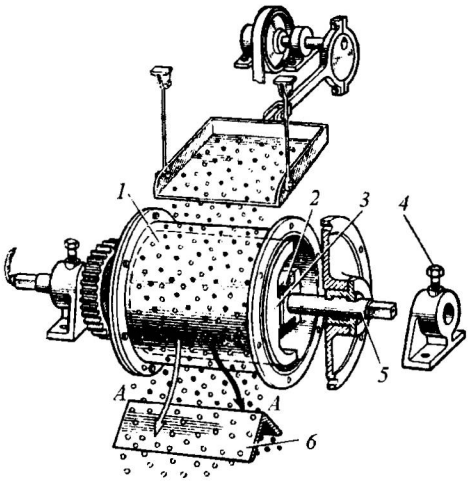
Inercinių-gravitacinių jėgų principu veikia ir įvairių konstrukcijų vėtyklės (11.67 pav.), skirtos birioms medžiagoms suskirstyti į atskiras frakcijas *5*, *6* ir *7*, pro antgalį *1* nedideliu greičiu pučiant oro srautą.

Iš orinių separatorių bei iš šiluminių agregatų (sukamosios krosnies, būgninės džiovyklos) ištekančiose dujose būna daug dulkių. Dulkėtas oras valomas sausuoju arba šlapiuoju būdu (žr. 10 dalį).

11.4.6. Magnetinė separacija

Magnetinių savybių turinčias daleles iš birių medžiagų galima atskirti įvairių tipų elektromagnetais.

Elektromagnetai gali būti tokių tipų: *nejudamieji būgnai, sukamieji skriemuliai, kabinamieji ir kilnojamieji* elektromagnetai, *elektromagnetiniai filtruojantieji separatoriai.*

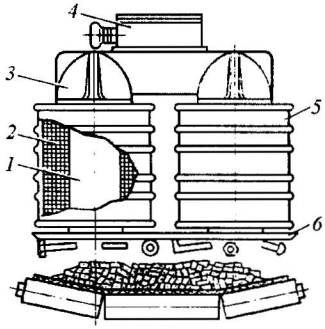


11.68 pav. Elektromagnetinis būgnas: *1* – sukamasis būgnas, *2* – elektromagneto ritė, *3* – magnetas, *4* – fiksatorius, *5* – velenas, *6* – skiriamoji plokštė

Elektromagnetinis būgnas (11.68 pav.) sudarytas iš magnetinės sistemos (ritės *2* ir magneto *3*), sumontuotos sukamajame būgne *1*. Sukamasis būgnas gaminamas iš greitai magnetines savybes prarandančių medžiagų, pvz., plieno arba žalvario. Nemagnetinės medžiagos dalelės, nuslydusios nuo besisukančio būgno, byra ant skiriamosios plokštės priekinės dalies (iki briaunos *A–A*). Magnetinės dalelės, pritrauktos įsimagnetinusio būgno, sukasi kartu su juo ir, būgnui išsimagnetinus, nubyra kitoje skiriamosios plokštės pusėje. Panašiai

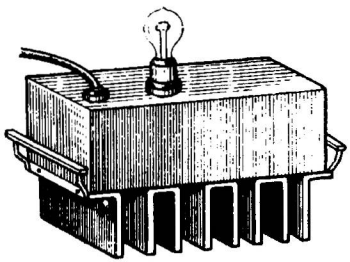
metalinės priemaišos išskiriamos iš medžiagos, subertos ant juostinio transporterio, kurio varančiajame skriemulyje įtaisytos elektromagnetinės ritės.

Kabinamaisiais elektromagnetais (11.69 pav.) pašalinami metaliniai daiktai iš viršutinių biriosios medžiagos sluoksnių, kurių storis ne didesnis kaip 100 mm, o transporterio juostos slinkimo greitis ne didesnis kaip 2 m/s.

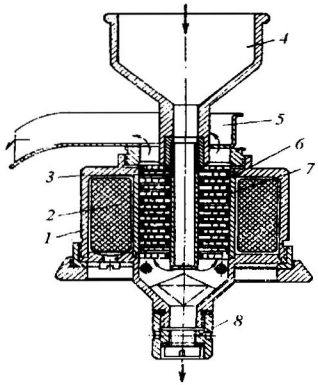


11.69 pav. Kabinamojo elektromagneto schema: *1* – šerdis, *2* – ritė, *3* – jungiamoji plokštelė, *4* – elektros srovės tiekimo mazgas, *5* – metalinis gaubtas, *6* – metaliniai antgaliai

Kilnojamaisiais elektromagnetais (11.70 pav.) ir *elektromagnetiniais filtruojančiaisiais separatoriais* (11.71 pav.) išskiriamos smulkios metalinės dalelės iš *skystų masių*. Metalines daleles, esančias skystos masės sraute, pritraukia kilnojamųjų elektromagnetų apatinės įmagnetintos plokštelės.



11.70 pav. Kilnojamasis elektromagnetas



11.71 pav. Elektromagnetinis filtruojantysis separatorius: *1* – korpusas, *2* – žiedinis elektromagnetas, *3* – vamzdelis, *4* – piltuvas, *5* – išvalytos masės latakas, *6* – elektromagneto vidinė sienelė, *7* – grotelių rinkinys, *8* – kamštis

Elektromagnetiniuose filtruojančiuosiuose separatoriuose valomoji skysta masė iš piltuvo *4* teka į apatinę filtro dalį ir kyla pro įsimagnetinusias grotelių *7* briaunas, kurios ir pritraukia metalines daleles. Filtro grotelės išvalomos taip: nutraukus skystos masės tiekimą, išjungiamas elektromagnetas ir per separatorių imama leisti vandens srovė. Elektromagnetinių filtruojančiųjų separatorių našumas – iki 3,5 m^3 skystos masės per valandą.

11.5. Presavimas

Presavimas – tai medžiagų apdorojimas dideliu išoriniu slėgiu, sudaromu įvairiais presais. Presuojama, kai reikia: 1) *iš medžiagų išskirti skystį; 2) iš plastiškų arba sausų medžiagų suformuoti reikiamos formos ir matmenų pusgaminius; 3) sutankinti birias medžiagas.*

11.5.1. Skysčių išskyrimas iš šlapių medžiagų presavimu

Skysčiai iš šlapių medžiagų presavimu išspaudžiami tais atvejais, kai tie skysčiai yra vertingi produktai arba kai skysčiai, likę kietoje medžiagoje, pablogina jos kokybę bei technines savybes. Šis procesas plačiai naudojamas maisto pramonėje, gaminant sultis, aliejus, riebalus ir panašius produktus.

Presavimu suartinant kietos medžiagos daleles, skystis iš pradžių išteka kanalais tarp dalelių, o jiems sumažėjus teka įvairaus skerspjūvio kapiliarais, susidariusiais sutankėjusios medžiagos sluoksnyje, ir procesas tampa analogiškas filtravimui. Skysčio tekėjimas kapiliarais aprašomas Puazeilio lygtimi:

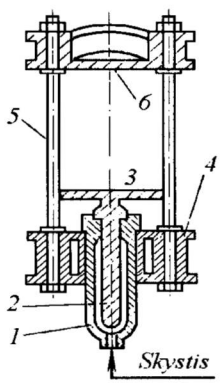
$$V = \Delta p \cdot d^2 \cdot n \cdot F \cdot \tau / (32 \cdot \mu \cdot l);$$

čia V – skysčio tūris, m^3, pratekantis kapiliaru per laiką τ, s; Δp – slėgio skirtumas kapiliaro galuose, Pa; d – kapiliaro skersmuo, m; n – kapiliarų skaičius medžiagos sluoksnio 1 m^2 plote; F – kapiliaro skerspjūvio plotas, m^2; μ – skysčio dinaminė klampa, Pa·s; l – kapiliaro ilgis, m.

Iš tikrųjų skysčio išspaudimo presavimu procesas yra sudėtingesnis, tačiau Puazeilio lygtis leidžia padaryti svarbias išvadas, kad norint gauti maksimalų skysčio tūrį: 1) neracionalu didinti spaudžiamos medžiagos sluoksnio storį, nes padidėja l; 2) spaudžiamą medžiagą tikslinga pašildyti (mažėja skysčio μ). Išspaudžiamo skysčio tūris taip pat didėja ir didinant išorinį slėgį (padidėja Δp), tačiau per daug padidinus slėgį, kapiliarų skerspjūvio plotas gali taip sumažėti, kad dėl to sumažės preso našumas. Todėl atsižvelgiant į medžiagos struktūrinių bei mechaninių savybių pasikeitimą ir gaunamo skysčio kiekį bei jo kokybę, eksperimentiškai nustatomas *optimalus darbinis slėgis.* Kad išsiskirtų kuo daugiau skysčio, medžiaga dažnai *prieš presavimą smulkinama, apdorojama termiškai arba elektros srove.*

Skysčiui išspausti naudojami hidrauliniai, pneumatiniai arba mechaniniai, periodiniai ir nuolatiniai presai.

Periodinis hidraulinis atviras skysčio išspaudimo presas (11.72 pav.) sudarytas iš storasienio darbinio cilindro *1*, pritvirtinto prie masyvios plokštės *4*. Cilindre laisvai slankioja plunžeris *2*, kuris, kildamas į viršų (tiekiant į cilindro apatinę dalį didelio slėgio skystį), kartu kelia ir plokštę *3*. Ant plokštės sukraunami stipraus tankaus audeklo paketai, į kuriuos sudedama susmulkintos medžiagos masė. Paketai atskirti plieninėmis skylėtomis plokštėmis. Kylant plokštei *3* į viršų, paketų rinkinys prispaudžiamas prie nejudamosios plokštės *6*, skysčiu sudaromas iš pradžių nedidelis (išspaudžiant augalinį aliejų iki 5 MPa) slėgis, o po to tam tikrą laiką palaikomas optimalus darbinis slėgis (iki 80 MPa).



11.72 pav. Periodinis hidraulinis presas

Jei darbinis slėgis cilindre p, tai plokštę *3* veikianti jėga F, N, apskaičiuojama pagal lygtį

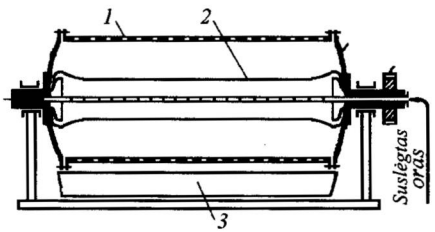
$$F = 0{,}9 \cdot p \cdot S; \qquad (11.93)$$

čia S – plunžerio skerspjūvio plotas, m^2; 0,9 – koeficientas, įvertinantis slėgio nuostolius dėl trinties cilindro tarpikliuose ir kreipiamosiose kolonose *5*.

Iš paketų išspaustas skystis nuteka į surenkamąją lėkštę, uždedamą ant apatinės judamosios plokštės *3*. Išspaudimo ciklo trukmė – 20...25 min.

Analogiškos konstrukcijos yra ir *hidrauliniai pusiau uždari* bei *uždari presai*, kurie skiriasi tik išspausto skysčio surinkimo būdu: pusiau uždaruose (drenažiniuose) presuose skystis išteka pro skylėtas plokštes, o uždaruosiuose presuose paketai sukraunami į uždarą dėžę. Slėgis į judamąją plokštę periodiniuose presuose gali būti sudaromas ne tik *hidrauliniu būdu*, bet ir *mechanine pavara* arba *rankiniu sraigtu*.

Periodiniai skysčių išspaudimo presai gali būti ir *pneumatiniai* (11.73 pav.). Jie sudaryti iš skylėto būgno *1*, į kurį periodiškai pakraunama presuojamoji medžiaga.



11.73 pav. Pneumatinis skysčių išspaudimo presas

Būgno centre yra guminis cilindras *2*, į kurį tiekiant suslėgtą orą, medžiaga yra spaudžiama prie būgno sienelių, o skystis pro būgno skylutes išteka į padėklą *3*. Išspaudžiant skystį, medžiaga yra keletą kartų supurenama, išleidus iš cilindro *2* suslėgtą orą ir pasukus būgną *1*. Išspaudžiant skystį šiuo būdu, presuojamoji medžiaga netrinama, mechaniškai nepažeidžiama žievelė ir sėklelės, todėl sultys (pvz., vynuogių) būna aukštos kokybės.

Nuolatiniai skysčių išspaudimo presai yra našesni, veikia įvairiais principais ir būna įvairių konstrukcijų. Plačiausiai maisto pramonėje naudojami *sraigtiniai išspaudimo presai* (11.74 pav.). Jie sudaryti iš mažėjančio skerspjūvio ploto skylėto būgno *2*, kuriame sukamas mažėjančio skersmens sraigtas *3*, kurio išėjimo galo link mažėja menčių žingsnis S.

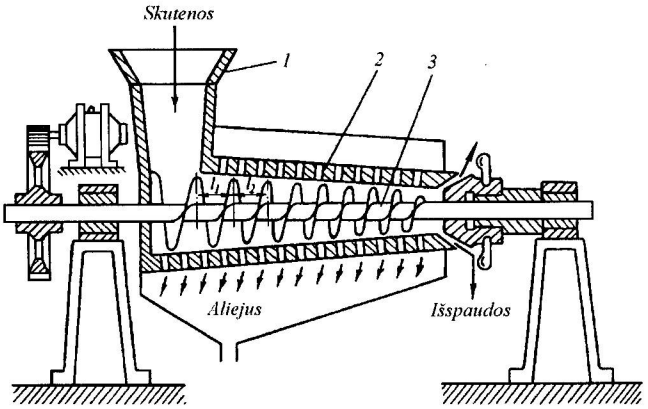
Sukantis sraigtui *3*, pro tiekimo liuką *1* tiekiama medžiaga yra stumiama link išspaudų iškrovimo galo ir dėl būgno skerspjūvio bei sraigto žingsnio mažėjimo vis labiau spaudžiama, presuojama. Iš medžiagos išspaustas skystis išteka pro būgno skylutes. Sraigto sukimo dažnis nedidelis – 5...20 aps./min, tačiau slėgis būgne gali siekti $4 \cdot 10^6$ Pa ir daugiau.

Sraigtinio preso našumas pagal tiekiamą masę G_m, kg/s, apskaičiuojamas taip:

$$G_m = \pi \cdot S \cdot n \cdot \rho \cdot \varphi \cdot D^2/4; \qquad (11.94)$$

čia S – sraigto žingsnis sraigto pradžioje, m; n – sraigto veleno sukimosi dažnis, aps./s; ρ – tiekiamos medžiagos piltinis tankis, kg/m^3; φ – būgno pripildymo koeficientas, įvertinantis sraigto veleno ir menčių užimamą tūrį; D – būgno skersmuo medžiagos tiekimo taške, m.

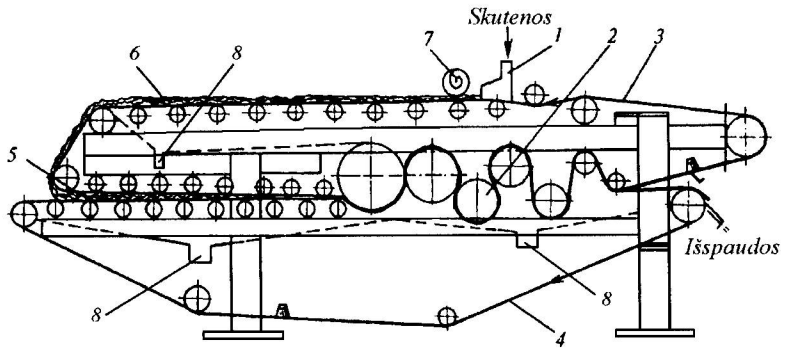
Išspausto skysčio kiekis ir jo kokybė daug priklauso nuo medžiagos suspaudimo tarp sraigto vijų laipsnio, kuris įvertinamas suspaudimo koeficientu $k = V_1/V_2$ (V_1 – pirmojoje, V_2 – paskutinėje sraigto vijoje esančios medžiagos tūris). Spaudžiant sultis iš vynuogių, $k = 3...6$, o spaudžiant iš sėklų augalinį aliejų, $k = 3...23$.



11.74 pav. Sraigtinis skysčių išspaudimo presas: *1* – piltuvas, *2* – būgnas, *3* – sraigtas

Analogišku principu veikia ir *nuožulnusis* bei *vertikalusis* sraigtiniai išspaudimo presai, kurių sraigtų velenai skysčio atskyrimo efektyvumui padidinti yra apgaubiami sietais. Naudojami taip pat *dviveleniai* sraigtiniai išspaudimo presai, kurių sraigtai sukami priešingomis kryptimis. Filtruojamieji sietai gaunami iš nerūdijančiojo plieno, skylutės juose daromos kūginio profilio, platėjančios į apačią.

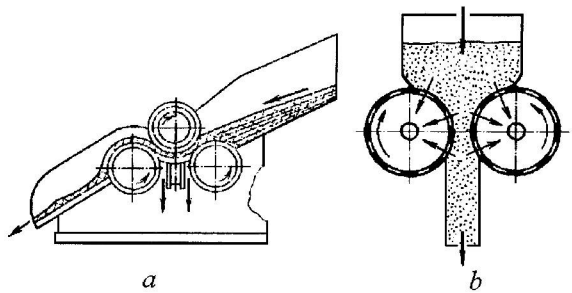
Sulčių gamyboje (pvz., obuolių sulčių iš sutarkuotos obuolių tyrelės) skystis nepertraukiamai gali būti atskiriamas ir palaipsniui didinant spaudimą, patekus masei tarp dviejų juostinių konvejerių juostų, pagamintų iš stiprių sintetinių pluoštų (11.75 pav.).



11.75 pav. Juostinis skysčių išspaudimo presas

Per krovimo bunkerį *1* sraigtiniu transporteriu *7* tolygiai paskirstyta masė iš pradžių juda su viršutiniu transporteriu, pro kurio audeklą zonoje *6* prasifiltruoja dalis skysčio. Nuožulnia viršutinio juostinio transporterio dalimi žemyn judanti masė purenasi, maišosi, atsiveria audinio poros, kapiliarai. Supurenta masė patenka į pleištinę zoną *5*, susidarančią tarp viršutinio *3* ir apatinio *4* transporterio juostų. Siaurėjant pleištiniam plyšiui, tolygiai didėja spaudimas į masę, praeinančią šioje zonoje kartu su apatiniu transporteriu. Paskui tarp viršutinio ir apatinio transporterio juostų suspausta masė pereina per nuosekliai išdėstytų besisukančių įtempimo volų zoną *2* („presavimo“ zoną), kurioje iš masės skystis išspaudžiamas galutinai. Iš viršutinės, pleištinės ir presavimo zonų išspaustas skystis patenka į atskirus surinktuvus *8*.

Dar vienas mechaninių išspaudimo presų tipas yra *valcinis skysčių išspaudimo presas* (11.76 pav., *a* ir *b*).



11.76 pav. Valciniai išspaudimo presai

Presai, kurių veikimo principas parodytas 11.76 pav., *a*, plačiai naudojami cukrui gaminti iš cukranendrių, o kurių veikimo principas parodytas 11.76 pav., *b*, – krakmolui gaminti iš tarkuotų bulvių tyrelės.

11.5.2. Plastiškų masių presavimas

Formavimo iš plastiškų masių presais apdorojamoms medžiagoms suteikiama reikiama geometrinė forma, labai nepakeičiant jų tūrio ir tankio.

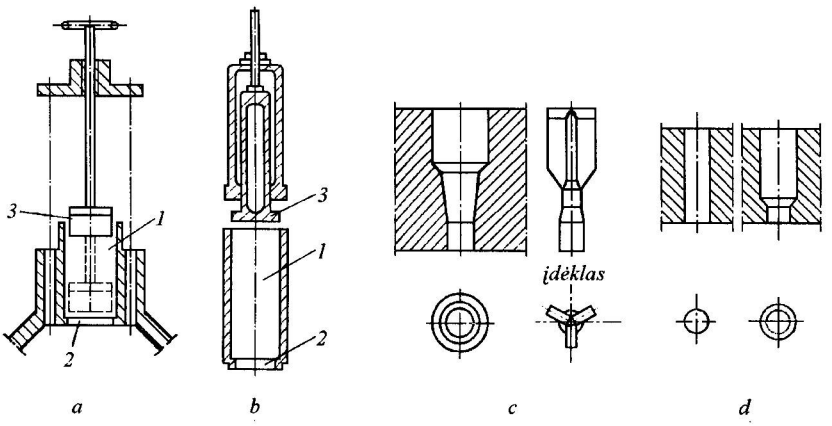
Šių aparatų darbui didelę įtaką turi pačių plastiškų masių relaksacijos ir klampiojo tekėjimo procesai. Plastiškos medžiagos tampriai deformuojasi tik iki tam tikros įtempių ribos, kurią viršijus jos pradeda tekėti kaip klampūs skysčiai. Tačiau plastiškos klampios medžiagos teka ne pagal Niutono dėsnį. Plastiškai klampioms medžiagoms būdingos *relaksacijos*, t. y. savaiminis medžiagos įtempių mažėjimas (*įtempių susigėrimas*), esant pastoviai, fiksuotai, jos deformacijai. Idealiai tamprioje kietoje apkrautoje medžiagoje tampriosios deformacijos įtempiai gali išlikti neribotą laiką, skysčiuose jie susigeria dideliu greičiu, atvirkščiai proporcingai jų dinaminei klampai (todėl tokių mažos

dinaminės klampos skysčių kaip vanduo relaksacijos trukmė beveik lygi nuliui). Tuo tarpu plastiškai klampių, tešlos pavidalo medžiagų relaksacijos trukmė yra išmatuojamas sekundžių eilės dydis, apibūdinantis medžiagos mechaninių savybių pokytį. *Relaksacijos periodu* θ_l laikoma laikas, per kurį įtempių dydis, esant pastoviai tampriajai deformacijai, sumažėja e kartų (e = *2,3* – natūrinių logaritmų pagrindas). Relaksacijos periodo trukmė yra labai svarbi plastiškos medžiagos mechaninė savybė, formuojant pusgaminius presais štampavimo būdu. Norint pusgaminio paviršiuje gauti tikslų, nesusiliejusį reljefinį piešinį, vieno štampavimo trukmė neturi viršyti pusgaminio medžiagos relaksacijos periodo trukmės. Pvz., maisto pramonėje įvairių kvietinių biskvitų tešlų relaksacijos periodo trukmė: θ_l = *1,2...6* s.

Formavimo iš plastiškų masių aparatai pagal veikimo principą gali būti suskirstyti į tris pagrindines grupes: *išspaudimo, štampavimo ir valcavimo.*

Formavimo išspaudimu presai sudaryti iš spaudimo elementų ir formavimo matricos. Slėgis į plastišką medžiagą šiuose presuose sudaromas tokiu pat principu veikiančiais elementais kaip ir skysčių išspaudimo presuose. Skylėta matrica suteikia pusgaminiams reikiamą geometrinę formą: stačiakampių gretasienių, lazdelių, vamzdelių ir pan.

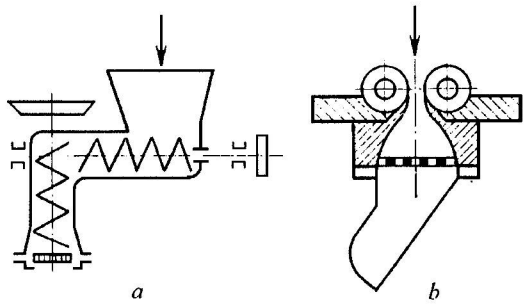
Formuojant pusgaminius *periodiniais išspaudimo presais* (11.77 pav., *a* ir *b*) plastiška medžiaga dedama į preso darbinį cilindrą *1* ir mechaniniu sraigtiniu (*a*) arba hidrauliniu (*b*) būdu slegiant puansoną *3* išstumiama pro matricą *2*.



11.77 pav. Formavimo išspaudimu periodinių presų (*a*) ir (*b*) bei jų matricų formų (*c*) schemos: *a* – sraigtinio preso, *b* – hidraulinio preso, *c* – su įdėklu tuščiaviduriams, skylėtiems arba vamzdžio pavidalo pusgaminiams formavimuoti, *d* – ištisinių lazdelių pavidalo gaminiams formavimuoti

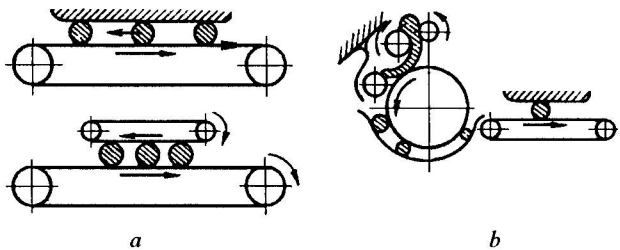
Matricos ertmės, pro kurias išstumiama plastiška medžiaga, gali būti įvairios geometrinės formos bei dydžio, į jas gali būti įmontuojami reikiamos formos įdėklai (11.77 pav., *d* ir *e*). Matricos ir įdėklai dažnai gaminami iš žalvario, bronzos arba nerūdijančiojo plieno.

Nuolatiniuose formavimo presuose medžiaga spaudžiama sraigtais arba volais. Maisto pramonėje sraigtiniais ir valciniais presais (11.78 pav., *a* ir *b*) presavimo kameroje prieš matricą sudaromas 0,6...0,9 MPa slėgis, o medžiaga išspaudžiama pro jos skylutes 1...2 m/s greičiu.



11.78 pav. Nuolatiniai formavimo presai: *a* – sraigtinis, *b* – valcinis

Valcavimo įrenginiai naudojami, kai pusgaminiams reikia suteikti apvalią arba cilindrinę formą. Tai pasiekiama, medžiagos gabalėliams riedant tarp dviejų skirtingais greičiais judančių paviršių (11.79 pav.).



11.79 pav. Plastiškų medžiagų valcavimo įrenginiai:
a – juostiniai, *b* – būgniniai-juostiniai

Šiuose įrenginiuose į formuojamą plastišką medžiagą sudaromas nedidelis slėgis, kuris dažniausiai neviršija 0,1 MPa.

Štampavimo aparatai naudojami reikiamos formos pusgaminiams išspausti iš nenutrūkstamai judančios plastiškos arba elastingos medžiagos juostos. Dažnai tuo pačiu metu pusgaminio paviršiuje įspaudžiamas reljefinis piešinys. Plastiškos medžiagos juosta, pratraukta pro besisukančių volų sistemą,

patenka ant transporterio, kuriame štampavimo įrenginiu iškertamas reikiamos formos juostos gabalėlis. Transporteris su juosta gali judėti nenutrūkstamai arba sustodamas. *Periodiniuose* štampavimo įrenginiuose štampavimo metu plastiškos juostos judėjimas sustabdomas. *Nuolatiniuose* štampavimo įrenginiuose štampuojančioji dalis štampavimo metu juda kartu su juosta ir iškerta juostos gabalėlį, nestabdydama jos judėjimo. Naudojami taip pat rotaciniai nuolatiniai štampavimo įrenginiai, kuriuose štampavimo puansonai sumontuoti ant masyvaus sukamo volo, prie kurio transporteriu judanti plastiškos medžiagos juosta prispaudžiama apatiniu minkštos gumos volu.

11.5.3. Birių medžiagų presavimas

Kai kuriais atvejais birias medžiagas patogiau perdirbti, naudoti arba transportuoti sutankintas. Mechaninis supresuoto briketo, cilindro ar tabletės stiprumas priklauso nuo medžiagos sutankinimo laipsnio, dalelių sankibos jėgų dydžio ir kapiliarinių jėgų, atsirandančių sutankinant medžiagą, poveikio. Jei šios jėgos yra per mažos, presuojamos birios medžiagos suvilgomos rišamosios medžiagos tirpalu, pvz., briketuojant kombinuotuosius pašarus panaudojama melasa.

Masės sutankinimo laipsnis apibūdinamas presavimo koeficientu:

$$\beta = \left[\left(V_1 - V_2 \right) / V_1 \right] \cdot 100 ; \qquad (11.95)$$

čia V_1 ir V_2 – medžiagos tūris matricoje prieš ir po presavimo, m^3.

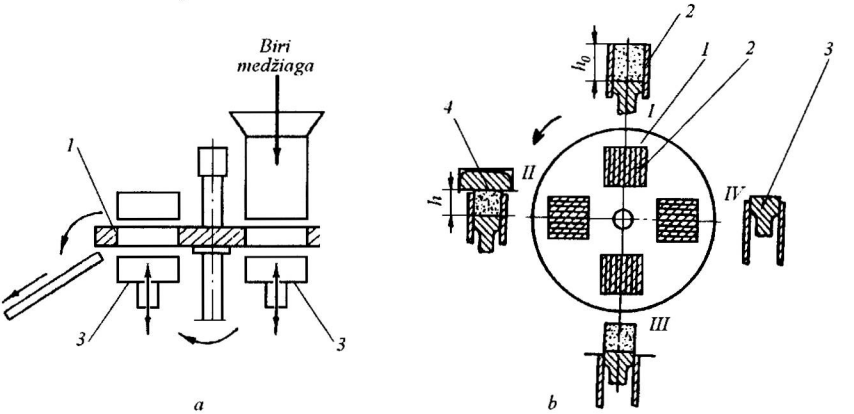
Eksperimentiškai nustatyta, kad didžiausia β vertė gali būti gauta tam tikrą laiką palaikant matricoje pastovų slėgį ir veikiant medžiagą pakartotinėmis apkrovomis. Didinant pakartotinių apkrovų skaičių presuojamos medžiagos tankis artėja prie didžiausios kritinės ribos.

Efektyvus yra *dvipusis* matricoje esančios medžiagos spaudimas, kuris įgalina mažesniu slėgiu gauti tolygesnio tankio supresuotą medžiagą.

Birios medžiagos gali būti presuojamos *diskiniais* (karuseliniais) arba *strypiniais* formavimo presais. *Diskinis presas* (11.80 pav.) sudarytas iš sukamo horizontalaus storasienio disko *1*, kuriame yra įmontuotos keturios formavimo matricos *2*. Matricos ertmė išilginėmis pertvaromis gali būti perskirta į keletą sekcijų, jei reikia suformuoti stačiakampio gretasienio pavidalo pusgaminius.

Kiekviena matrica turi savo puansoną *3*, judantį vertikalia kryptimi aukštyn ir žemyn ir *I* padėtyje (11.80 pav., *b*) sudarantį matricos dugną. Pirmojoje padėtyje birios medžiagos pripildyta matrica, pasisukus diskui 90° kampu pereina į *II* padėtį, kurioje, sustabdžius diską ir uždengus matricą plokšte *4*, medžiaga puansonu yra supresuojama iki sluoksnio aukščio *h*. Diskui *1* vėl pasisukus 90° ir matricai perėjus į *III* padėtį supresuotas pusgaminis puansonu

yra išstumiamas iš matricos, o *IV* matricos padėtyje pusgaminis nustumiamas nuo preso plokštumos ant transporterio. Diskui vėl grįžus į *I* padėtį, puansonas matricoje nusileidžia į gylį h_o, matrica pripildoma birios medžiagos ir presavimo ciklas kartojasi.



11.80 pav. Diskinio preso veikimo schemos:
a – skersinis pjūvis, *b* – preso padėčių schema

Strypiniu presu formuojami cilindriukų formos pusgaminiai. Formavimo matrica šiuose presuose yra ilgas kanalas, atviras iš abiejų galų, o puansonas – storas plieninis strypas, kuris yra šarnyriškai sujungtas su švaistikliniu mechanizmu ir cikliškai juda pirmyn ir atgal.

11.6. Granuliavimas

Granuliavimas – tai grūdelių (lot. *granulum* – grūdelis) pavidalo medžiagos formavimo procesas. Cheminėje technologijoje granuliavimu vadinami ne tik apvalių, bet ir kitų geometrinių formų (tablečių, briketų) diskretinių dalelių formavimo procesai. Granulės gali būti formuojamos iš smulkių miltelių, plastiškų masių, tirpalų ir suspensijų. Granuliuotos birios medžiagos turi nemaža techninių pranašumų: jos nedulka transportuojamos, dozuojamos ir sandėliuojamos, užima mažesnį tūrį, nelimpa prie technologinių aparatų paviršių; sugranuliavus smulkias birias medžiagas sumažėja transportavimo nuostoliai, pagerėja sanitarinės darbo sąlygos (tai ypač svarbu dirbant su kenksmingomis medžiagomis). Kai kuriais atvejais pneumatiniu ir vibraciniu būdu galima transportuoti tik nedulkančias granuliuotas medžiagas.

Granuliavimo procesas plačiai naudojamas maisto, vaistų, statybinių medžiagų ir kt. gamyboje, žemės ūkyje, atliekų utilizavimo ir kitose pramonės ir ūkio srityse.

Dažniausiai granuliavimo būdu gaminami medžiagų *briketai* (100...200 mm dydžio), *gumulėliai* (20...40 mm), *granulės* (1...20 mm) ir *tabletės* (0,1...8,0 g masės, 4...50 mm dydžio).

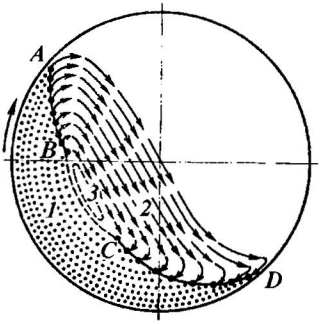
Granuliavimo būdai: presavimas; ridenimas; miltelių, tirpalų ir suspensijų granuliavimas dispersiniuose srautuose.

Granuliuojant presavimu birios medžiagos sudrėkinamos, paruošiama plastiška masė, kuri hidrauliniais presais įspaudžiama į reikiamos geometrinės formos ir tūrio tuštumas. Presuojant sraigtiniais presais, pro preso galvutės skylutes išspaudžiama tolydi pusgaminio juosta, kuri po to supjaustoma į nedideles granules.

Presavimu taip pat gaminami *briketai ir tabletės. Tabletės* gaunamos presu suspaudžiant medžiagą, įdėtą į tam tikrą formą, 80...120 MPa ir didesniu slėgiu. Taip pat formuojami *briketai* (briketai yra didelių matmenų tabletės).

Tabletės ir briketai presuojami iš smulkių miltelių arba iš jau granuliuotų medžiagų *švaistikliniais, hidrauliniais* arba *rotoriniais* presais.

Ridenimu iš smulkiadispersių miltelių arba plastiškų masių sudaromos rutulio formos granules. Gali būti granuliuojama įrenginiuose su *pasyviu* ir su *aktyviu darbiniu paviršiumi. Granuliatoriuose su pasyviu paviršiumi* (besisukančiuose cilindriniuose arba kūginiuose būgnuose arba besisukančiuose lėkštiniuose granuliatoriuose) granulės susidaro smulkiadispersėms dalelėms uždaru ciklu riedant besisukančios lėkštės arba vidiniu būgno paviršiumi bei pačiame riedančiame sluoksnyje ir dėl autohezinių jėgų poveikio joms agreguojantis į sferines granules (11.81 pav.). Kartais riedanti granuliuojama medžiaga surišama į sferines granules, panaudojant rišamąsias medžiagas. Granuliavimo metu galima kartu sumaišyti ir birių medžiagų mišinio komponentus.



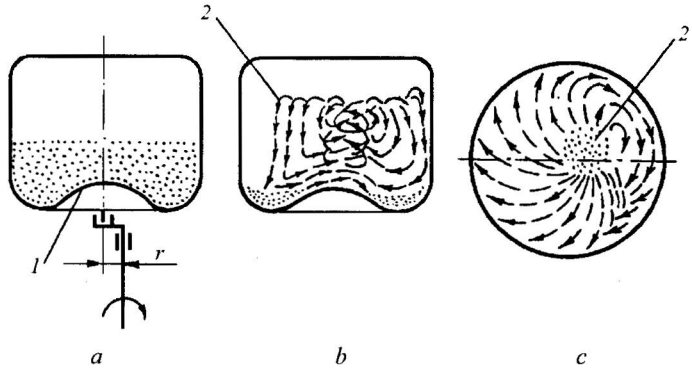
11.81 pav. Birių dalelių judėjimo būgniniame autoheziniame schema:
1 – pasyvaus dalelių judėjimo zona, *2* – aktyvaus granulių susidarymo zona,
3 – galimų stambesnių gumulėlių susidarymo zona

Realiuose procesuose pradinių birių medžiagų dalelės gali būti netolygių matmenų, netolygiai dozuojamos bei sudrėkinamos rišamuoju skysčiu. Dėl šių priežasčių granuliatoriuje, ypač jo centrinėje zonoje *3*, susidaro netolygių dydžių, stambesnės granulės. Todėl tais atvejais, kai reikia tolygaus dydžio granulių, gautos granulės klasifikuojamos pagal dydį ir per mažos granulėlės grąžinamos pakartotinai granuliuoti.

Granuliavimo procese stambesnės dalelės tampa granulių susidarymo centrais.

Kai į smulkesnę birią granuliuojamą medžiagą pridedama iš anksto paruoštų stambesnių, vienodo dydžio dalelių – granuliavimo branduolių, toks procesas vadinamas *dražė gamyba.* Gautų dalelių dydis reguliuojamas pridedamų branduolių dydžiu ir jų skaičiumi. Dražė gamybos procese atsitiktinio dydžio granulės nesusidaro, nes branduolių dydžio didėjimas reguliuojamas daugkartiniu riboto kiekio smulkių birių dalelių ir jas drėkinančio skysčio pridėjimu granuliavimo metu. Formuojant dražę, granulių paviršiuje galima sudaryti skirtingos sudėties sluoksnelius. Šiuo būdu gaminamos maisto produktų granulės, vaistai, vitaminai, apdorojamos smulkios sėklelės žemės ūkyje. Dražė formavimo aparatuose dalelių judėjimo pobūdis yra toks pat, kaip ir būgniniuose arba lėkštiniuose granuliatoriuose. Aktyvaus granuliavimo zona *2* (11.81 pav.) yra tik iš virš linijos *ABCD* ir sudaro apie 50 % bendro įkrovos tūrio.

Granuliatoriuose su aktyviu darbiniu paviršiumi (11.82 pav.) tuo pačiu metu granuliuojama visa biri masė. Šio periodinio granuliatoriaus dugne padarytas pusapvalis iškilimas *1*, kurio paskirtis ta, kad, ekscentriškai sukant granuliatoriaus būgną, jame susidarytų pulsuojantis sūkurinis į viršų kylančių dalelių srautas (11.82 pav., *b* ir *c*).

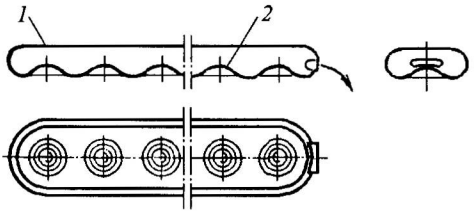


11.82 pav. Birių dalelių judėjimo periodiniame autoheziniame granuliatoriuje su aktyviu darbiniu paviršiumi schemos: *1* – dugno iškilimas, *2* – sūkurinis kylančių dalelių srautas, *r* – granuliatoriaus sukimo ekscentricitetas

Tokio tipo granuliatoriuose nesusidaro stambesni gumulėliai, pagerėja granuliavimo kokybė, padidėja granuliatoriaus našumas.

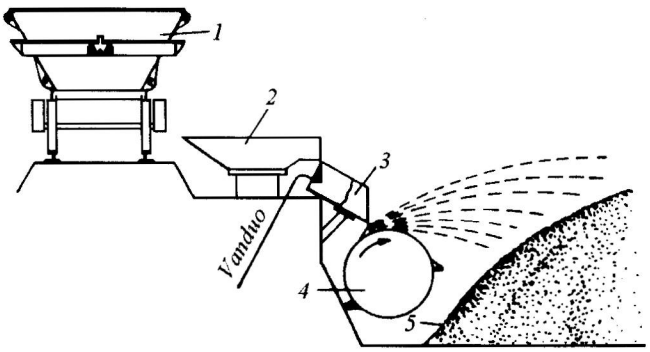
Nuolatinio granuliatoriaus su aktyviu darbiniu paviršiumi (11.83 pav.) lovelio pavidalo dugne nuosekliai eile išdėstomi iškilimai, dėl kurių iš loveliu judančios birios medžiagos susiformuoja sferinės granulės.

Lovelio plotis būna 0,5...0,8 m, jo svyravimo dažnis 16...21 rad/s, o ekscentricitetas $r = 0{,}06...0{,}1$ m.



11.83 pav. Lovelio tipo autohezinio nuolatinio granuliatoriaus su aktyviu darbiniu paviršiumi schema

Rutulio formos granulės taip pat gali būti formuojamos *valciniais trupintuvais*, kurių vienas būgnas tuščiaviduris, pro jame esančias skylutes išspaudus plastiškos masės juosteles į besisukančio būgno vidinę ertmę. Taip, pvz., formuojamos keramzito granulės keramikos pramonėje.

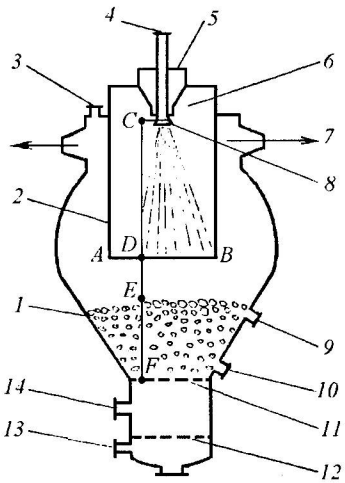


11.84 pav. Šlako granuliavimas pussausiu būdu:
1 – vagonėlis, *2* – lovys, *3* – latakas, *4* – būgnas, *5* – granuliuotasis šlakas

Hidraulinėms rišamosioms medžiagoms (pvz., šlakiniam portlandcemenčiui) gaminti naudojami granuliuoti aukštakrosnių arba rečiau elektrotermofosforiniai šlakai, kuriuos reikia granuliuoti. Šiuo atveju granuliavimas – tai *išlydytų šlakų staigus ataušinimas vandeniu arba oru*, kad ataušę šlakai būtų

stikliški ir lengviau malami. Aukštakrosnių šlakai granuliuojami šlapiuoju ir pussausiu būdu. Granuliuojant šlapiuoju būdu, šlakų lydalas iš aukštakrosnių pilamas į vandenį, kuriame jis staigiai ataušta ir sutrupa į smulkius gabaliukus. Tačiau taip pagamintas granuliuotasis šlakas turi (25...35 %) vandens ir prieš malant jį reikia džiovinti. Granuliuojant šlaką pussausiu būdu (11.84 pav.), šlako lydalas iš aukštakrosnės pilamas į lovį, kuriame jis šiek tiek ataušinamas nedideliu vandens kiekiu. Paskui šlakas patenka ant besisukančio būgno *4* su išilginėmis briaunomis, kurios sutrupina šlaką į gabaliukus ir nusviedžia juos nuo būgno. Ore šlako gabaliukai staigiai ataušta ir sukietėja. Šiuo būdu gauto granuliuotojo šlako drėgnis būna 5...10 %.

Granuliavimas iš tirpalų, suspensijų ir pulpų efektyviausias dispersiniuose srautuose. Šiuo atveju galima gauti didelius sąveikaujančių skysčių sąlyčio paviršius ir viename aparate vykdyti ne tik disperguotų masių sutirštinimo bei adhezinio granuliavimo, bet ir susidariusių granulių džiovinimo procesus.



11.85 pav. Granuliavimo dispersiniame sraute schema:
1 – korpusas, *2* – cilindras, *3* – grąžinamų granulėlių tiekimo atvamzdis, *4* – granuliuojamos pulpos tiekimo vamzdis, *5* ir *13* – kūryklų dujų tiekimo atvamzdžiai, *6* – karštų dujų tiekimo tūta, *7* – panaudotų dujų pašalinimo antgaliai, *8* – pulpos tiekimo įrenginys, *9* – grąžinamų dulkių tiekimo atvamzdis, *10* – gaunamų granulių išleidimo atvamzdis, *11* – skylėtoji pertvara, *12* – apatinė skylėtoji pertvara, *14* – oro pašalinimo atvamzdis

Efektyvus yra granuliavimas pseudoverdančiajame sluoksnyje (11.85 pav.). Šių aparatų centrinėje dalyje sąveikauja iš dalies išdžiovinta disperguota masė ir po klasifikavimo į granuliatorių grąžinamos smulkiosios

granulės. Susidariusios stambesnės granulės galutinai išdžiovinamos įkaitusiame pseudoverdančiajame sluoksnyje, esančiame aparato apatinėje dalyje virš skylėtosios pertvaros *11*. Taip, pvz., iš superfosfato ir spirito gamybos žlaugtų gaminamos granuliuotosios trąšos.

11.7. Biriųjų ir plastiškųjų medžiagų maišymas

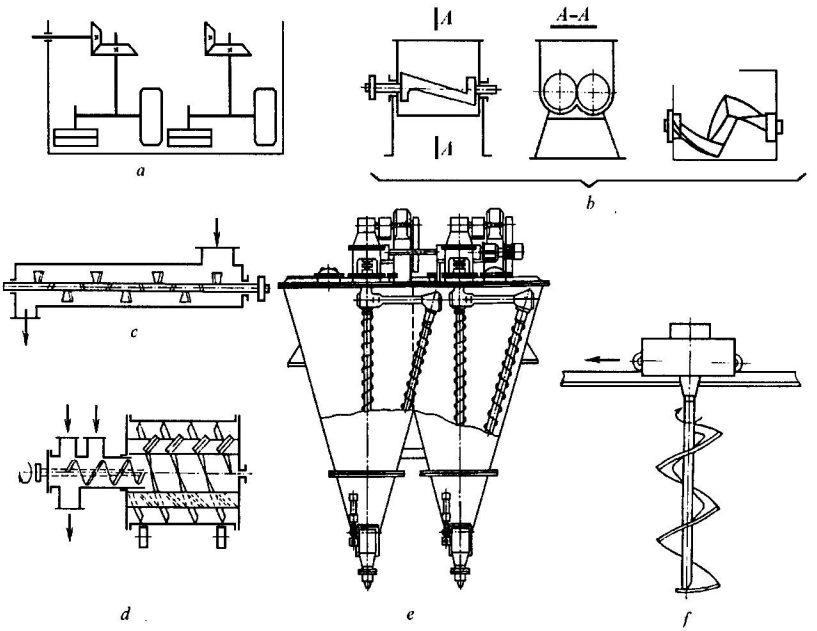
Biriosios medžiagos, naudojamos tolesniuose jų perdirbimo technologiniuose procesuose, gali būti *stambių grūdelių, smulkių miltelių, plastiškų klampiatakių, plastiškų elastingų* arba *suspensijų* pavidalo. Biriųjų ir plastiškųjų medžiagų maišymas skiriasi nuo skysčių maišymo ir maišymo skysčiuose (žr. 7 dalį). Jei mišinio komponentai yra smulkių miltelių pavidalo, tai būtina taikyti tokius maišymo būdus ir įrenginius, kad galima būtų išvengti savaiminio agregatų susidarymo (šiuo tikslu maišomi sausi mišiniai aeruojami, visi komponentai kartu arba atskirai malami šlapiuoju būdu, šlapiuoju būdu sumaltų komponentų suspensijos sumaišomos). Ruošiant medžiagų mišinius iš klampiatakių plastiškų masių, į jas intensyviai maišant įterpiamas nemažas kiekis oro. Kai kada (pvz., gaminant akytuosius gaminius) tai pageidautina, tačiau daugeliu atvejų plastiškoje masėje esantis oras ir kitos dujos yra žalingi gaminių savybėms ir tada dujinius komponentus iš maišomos masės reikia pašalinti vakuumavimo būdu. Maišant plastiškas elastingas medžiagas naudojami sudėtingo judesio maišikliai. *Lengviausiai* ir greičiausiai sumaišomos *stambiagrūdės* medžiagos.

Stambiagrūdėms masėms gauti dažniausiai atskiri komponentai sausuoju būdu smulkinami iki reikiamos granuliometrinės sudėties, po to jie dozuotais kiekiais sumaišomi taip pat sausuoju būdu, masė sudrėkinama vandeniu, vandens garais, laikinųjų rišiklių suspensijomis (pvz., PAM, klijuojančiųjų priedų, molio ir pan.) ir vėl sumaišoma pusgaminiams formuoti. Šioms masėms paruošti naudojami nuolatiniai maišytuvai: *sraigtinės, mentinės, išcentrinės, būgninės ir smūginės maišyklės*, taip pat *periodiniai* maišymo įrenginiai (*bėgūninės maišyklės, Z ir V tipo maišyklės, rotorinės, pneumatinės maišyklės ir pseudoverdančiojo sluoksnio maišyklės).* Pagal Frudo kriterijų maišyklės skirstomos į *lėtaeiges ir greitaeiges*:

$$F_r = w^2 / (R \cdot g); \qquad (11.96)$$

čia w – maišiklio periferinis apskritiminis greitis, m/s; R – maišiklio sukimosi spindulys, m; g – laisvojo kūnų kritimo pagreitis, m/s^2.

Būgninių maišyklių R nustatomas pagal būgno vidinio paviršiaus tašką, sraigtinių ir mentinių maišyklių – pagal sraigto arba mentės skersmenį, o w yra šiuos spindulius atitinkantis apskritiminis sukimosi greitis. Maišyklės yra priskiriamos prie *lėtaeigių*, jei $F_r < 30$ (11.86 pav.).



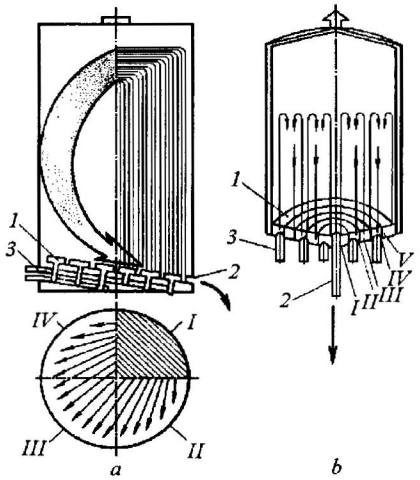
11.86 pav. Lėtaeigių maišyklių, naudojamų birioms medžiagoms maišyti, veikimo schemos: *a* – bėgūninės maišyklės, *b* – mentinės periodinės su *Z* pavidalo mentėmis, *c* – mentinės dvivelenės (arba daugiavelenės) nuolatinės, *d* – būgninės, *e* – sraigtinės su planetiniu sraigtiniu maišikliu, *f* – sraigtinės su slenkančiąja sukamojo sraigto ašimi

Maišymui intensyvinti mentinių maišyklių (11.86 pav., *b* ir *c*) velenai sukami priešingomis kryptimis. Jei reikalingi dideli našumai, mentinėje nuolatinėje maišyklėje (11.86 pav., *c*) įrengiami keturi sukamieji velenai su menčių sistemomis, sudarančiomis priešingų krypčių sraigtines linijas. Šiose maišyklėse medžiaga kartu ir transportuojama.

Būgninėse maišyklėse (11.86 pav., *d*) medžiaga maišoma sukant būgną, kuriame įrengtomis sraigtinėmis mentelėmis medžiaga perpilama iš vienos būgno vietos į kitą. Medžiaga į būgną tiekiama ir sumaišyta iš jos iškraunama sraigtiniu transporteriu.

Kūginė maišyklė su dvigubu planetiniu sraigtiniu maišikliu skirta maišyti grūdelių pavidalo birioms medžiagoms, kurių dalelių dydis neviršija 10 mm. Sukant elektros varikliais maišiklio sraigtus *3* apie savo velenų ašis ir apie vidinį kūginį paviršių, maišomos medžiagos keliamos į kūgių *2* viršutinę dalį ir, veikiamos sunkio jėgos, krinta žemyn. Šiuo būdu medžiagos gerai sumaišomos, nedidelės maišymo energijos sąnaudos. Sraigto sukimosi dažnis 60 aps./min, o vediklio – 1,58 aps./min.

Sraigtinės maišyklės su slenkančiąja sraigto ašimi (11.86 pav., *f*) sudarytos iš keleto vertikalių sraigtų, pritvirtintų prie judamojo rėmo, kuriam judant besisukantys sraigtai yra stumiami maišomoje medžiagoje.



11.87 pav. Kvadratinio (*a*) ir geizerinio (*b*) miltelių maišymo silosuose schemos: *1* – akytosios plytelės, *2* – iškrovimo atvamzdis, *3* – oro tiekimo vamzdžiai, *I–V* – silosų dugno sektoriai

Prie lėtaeigių maišytuvų taip pat priskiriami smulkiagrūdžių biriųjų medžiagų didelių kiekių homogenizavimo bei laikymo pseudotakios būsenos įrenginiai – *silosai*. Tai vertikalūs didelės talpos cilindriniai rezervuarai, į kurių apatinę dalį pro akytas keramines arba metalines plyteles bei specialų tankų audinį (beltingą) tam tikra seka pučiamas suslėgtas (0,11...3 MPa) oras. Milteliai silosuose dažniausiai maišomi *dviem būdais*: 1) *kvadratiniu*, 2) *geizeriniu* (11.87 pav.).

Maišant *kvadratiniu* būdu ant siloso dugno suklojamos akytosios plytelės, kurios sudaro keturis sektorius. Į kiekvieną sektorių suslėgtas oras tiekiamas atskirai ir sektoriai iš eilės 15 min stipriau aeruojami. Šiam tikslui į vieną sektorių tiekiama 75 %, o į kitus tris – 25 % bendro suslėgto oro kiekio. Maišant šiuo būdu, milteliai geriausiai susimaišo, kai silosų aukščio ir skersmens santykis yra nuo 1,5:1 iki 2:1.

Maišant *geizeriniu* būdu, akytosios plytelės sudaro penkias koncentrines sekcijas, į kurias suslėgtas oras tiekiamas atskirai. Iš pradžių visos sekcijos aeruojamos vienodo slėgio oru tol, kol medžiaga silose tampa taki. Po to į sekcijas tiekiamas skirtingo slėgio oras: į tris nelygines – 0,14 MPa, o į dvi lygines – 0,11 MPa. Kas 5...10 min slėgis sekcijose keičiamas. Maišant geizeriniu būdu, vieno siloso medžiagų homogenizacija trunka apie 20 min. Homogenizuojant

geizeriniu būdu, galima įrengti didelės talpos silosus, kurių aukščio ir skersmens santykis 1:1. Silosuose telpa iki 10000 t miltelių. Dideliuose silosuose lengviau suvienodinti sudaromų mišinių savybes, koreguoti sudėtį, bet medžiagoms aeruoti sunaudojama daug elektros energijos. Šiam trūkumui pašalinti homogenizavimo silosų dugno centre kartais įrengiama nedidelė maišymo kamera, į kurią nuolat tiekiama vis kita miltelių mišinio dalis. Kadangi suslėgtas oras tiekiamas tik į maišymo kamerą, tai jo reikia daug mažiau.

Sukurti ir dviejų aukštų *gravitacinio maišymo silosai*. Juose milteliams maišyti panaudojamas srauto turbulentiškumas, susidarantis dėl miltelių, byrančių iš viršutinės siloso dalies (viršutinio aukšto) į apatinę, sluoksnių judėjimo greičių nevienodumo. Centrinėje siloso dalyje miltelių byrėjimo greitis didžiausias ir palaipsniui mažėja horizontalia siloso sienelės kryptimi. Dėl to prie siloso sienelių esančios dalelės juda horizontalia kryptimi centro link, taigi milteliai intensyviai maišosi.

Laikant medžiagų miltelius dideliuose silosuose, negalima ignoruoti savaiminių *autohezijos ir adhezijos* reiškinių, kurie gali sukelti medžiagų agregaciją. Daugiau sukimba tos medžiagos, kurių dalelės mažesnės.

Van der Valso traukos jėgos susidaro dėl fliuktuojančiųjų elektrinių dipolių tarpusavio sąveikos vienoje molekulėje ir indukuoto dipolio gretimoje molekulėje, o jei molekulėse yra pastovieji dipoliai – dėl jų tarpusavio sąveikos. Dėl pirmosios sąveikos atsiradusios tarpusavio traukos jėgos vadinamos *Londono dispersinėmis jėgomis*. Tarp dviejų mažų sferinių dalelių susidaranti (kai $h \leq a$) traukos jėga F_a apskaičiuojama pagal lygtį

$$F_a = +A \cdot a/(24 \cdot h^2); \qquad (11.97)$$

čia A – Hamakerio konstanta; a – dalelės skersmuo, m; h – atstumas tarp dviejų dalelių paviršių, m.

Hamakerio konstanta A priklauso nuo dalelių sudėties, jų molekulinės struktūros ir terpės tarp jų rūšies. Jos skaitinė vertė mažesnė, kai dalelių ir tarp jų esančios terpės cheminė sudėtis yra paprastesnė.

Londono dispersinės sąveikos jėgos nėra didelės, tačiau jos sukelia smulkiųjų dalelių *adheziją ant makropaviršių* (smulkinimo, dozavimo, transportavimo, laikymo įrenginių) bei *spontaninę savaiminę dalelių tarpusavio agregaciją* (autohezinę sąveiką) tuose pačiuose aparatuose ir dėl to juose sunkiau vyksta technologiniai procesai. Šios jėgos taip pat gali sukelti dalelių *koaguliaciją* skystose suspensijose.

Dalelių agregacija įvyksta tik susmulkinus medžiagą iki tam tikro *kritinio dydžio* a_{kr}, kai Londono dispersinės sąveikos jėga F_a tampa didesnė už dalelės sunkio jėgą F_g:

$$\frac{F_a}{F_g} = \frac{A \cdot a/(24 \cdot h^2)}{(\pi \cdot a^3/6) \cdot \rho \cdot g}; \qquad (11.98)$$

čia $\pi \cdot a^3/6$ – sferinės dalelės tūris, m^3; ρ – dalelės medžiagos tankis, kg/m^3.

Kadangi dviejų sferinių dalelių, esančių tam tikroje terpėje A, ρ ir g yra pastovūs dydžiai, o $h << a$, tai šį santykį galime išreikšti taip:

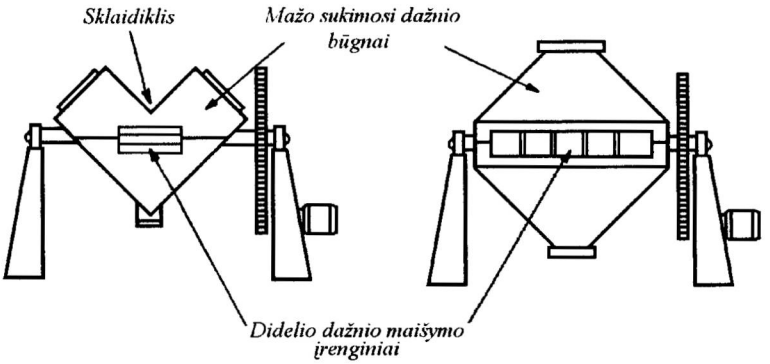
$$F_a/F_g \approx C/a^2 . \qquad (11.99)$$

Iš šios išraiškos matyti, kad, mažėjant a, santykis F_a/F_g sparčiai didėja, o a sumažėjus iki tam tikro kritinio dydžio a_{kr}, $F_a > F_g$ ir dalelės spontaniškai agreguojasi. Pvz., mineraliniai milteliai sukimba, kai smulkinamų dalelių dydis sumažėja apytiksliai iki 40 mikronų.

Smulkiadispersėse medžiagose priklausomai nuo dalelių prigimties, paviršinių sluoksnių savybių (laisvų elektrinių krūvių, nesočiųjų grupių bei radikalų buvimo) bei dalelių dydžio ir jų suartėjimo sąlygų (dalelių prispaudimo jėgos, temperatūros, terpės) gali susidaryti ne tik silpni Londono dispersinės sąveikos (van der Valso jėgų), bet ir stiprūs valentiniai ryšiai. Dėl šių ryšio jėgų milteliuose gali susidaryti *agregatų ir gumulėlių*, kurių dydis nuo keleto mikronų iki kelių centimetrų. Dėl autohezinės dalelių sąveikos gali susidaryti ir *tūrinė poringa dispersinė sistema* (dėl šios priežasties dulkių valymo įrenginiai užsikemša dulkėmis, kurias sunku pašalinti). Ribinė agregacijos būsena susidaro medžiagai susigulėjus, kai visa miltelių masė virsta monolitiniu kūnu (taip gali atsitikti netinkamai ilgesnį laiką laikant smulkiadisperses medžiagas bunkeriuose ir silosuose). Apatiniai sluoksniai bunkeriuose ir silosuose slegiami labiau negu viršutiniai, todėl juose gali susidaryti sukietėjusios medžiagos skliautai, trukdantys ją iškrauti ir dozuoti.

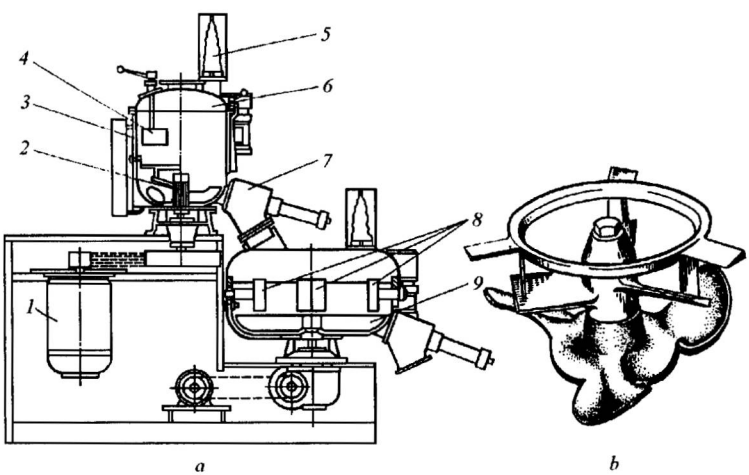
Miltelių *autohezinei sąveikai sumažinti* rekomenduojama suslėgtą orą, kuriuo jie maišomi, pašildyti iki temperatūros, 15...20 K aukštesnės už miltelių temperatūrą. Tada išvengiama drėgmės adsorbcijos. Dėl tos pačios priežasties rekomenduojama naudoti hidrofobines sienelių dangas, rūpestingai hermetizuoti laikomas medžiagas, vartoti adsorbentus.

Cheminėje technologijoje dažnai reikia *birias arba miltelių pavidalo medžiagas sumaišyti su nedideliu kiekiu skysčio* (pvz., rišiklio). Lėtaeigės maišyklės, kurių maišiklis sukasi, šiam tikslui netinka, kadangi maišomos medžiagos agreguojasi ir sunku vienodai paskirstyti maišomoje masėje pro purkštukus išpurškiamą skystį. Sudrėkinti milteliai po skysčio lašelių pasiskirstymo juose tampa nebetakūs, o kartais net granuliuoti. Šiais atvejais agregatus geriau disperguoja ir įterpiamą skystį tolygiau maišomoje masėje paskirsto bėgūninės maišyklės, smūginės maišyklės arba V tipo bei dvigubos kūginės lėtaeigės maišyklės, kurių centrinėje dalyje įtaisomi greitaeigiai maišymą intensyvinantys maišikliai (11.88 pav.).



11.88 pav. V tipo ir dvigubo kūgio maišyklių su greitaeigiais centriniais maišikliais schemos

Sukant šių maišyklių būgnus, kiekvieno ašinio veleno apsisukimo metu maišomų miltelių srautai, krisdami žemyn, persiskirsto, maišosi, homogenizuojasi. Be to, sukantis vidiniam greitaeigiam maišikliui, intensyviai disperguojami agregatai, susidarantys sausuose ir sudrėkintuose milteliuose. Šios maišyklės gaminamos iš plieno arba plastikų; kai kurie modeliai turi apvalkalus, skirtus maišomoms medžiagoms šildyti arba aušinti.



11.89 pav. Dvikamerės turbininės maišyklės schema (*a*) ir maišiklio rotoriaus bendras vaizdas (*b*): *1* – elektros variklis, *2* – rotorinis maišiklis, *3* – šildymo apvalkalas, *4* – deflektorius, *5* – rankovinis filtras, *6* – pasukamasis dangtis, *7* – sumaišytos medžiagos perpylimo įrenginys, *8* – aušinimo segmentai, *9* – mentinis maišiklis

Greitaeigės biriųjų medžiagų maišyklės ($F_r > 30$) būna vienkamerės ir dvikamerės. Kiekviena kamera gali turėti atskirą šildymo arba aušinimo apvalkalą. Pagal greitai sukamo rotoriaus konstrukciją greitaeigės maišyklės skirstomos į *mentines (turbinines), diskines ir sraigtines.*

Dvikamerė turbininė maišyklė (11.89 pav.) sudaryta iš viršutinės mišinio homogenizavimo kameros, kurioje dideliu dažniu sukamas maišiklis *2*. Rotorinis maišiklis sudarytas iš apatinių bei vidurinių menčių ir viršutinių peilių sistemos (*b*). Homogenizavimo kameroje sumaišytas mišinys lataku *7* tiekiamas į apatinę kamerą, kur jis papildomai maišomas mentiniu maišikliu *9* ir ataušinamas segmentais *8*. Intensyvaus maišymo metu išskiriančios dulkės valomos rankoviniais filtrais *5*.

Tokia turbininė maišyklė gali būti naudojama ne tik birioms, bet ir plastiškoms medžiagoms bei suspensijoms ir skysčiams homogenizuoti.

Pseudoverdančiojo sluoksnio greitaeigėse maišyklėse dideliu dažniu (300...3000 aps./min) sukant rotorių su dviem arba trimis eilėmis horizontalių peilinių mentelių, medžiaga nusviedžiama link maišyklės sienelių bei į viršų ir susidaro pseudoverdančiosios būsenos cirkuliacinis srautas. Į viršų kylantis srautas neleidžia drėgnai medžiagai prilipti prie maišyklės sienelių.

Kaip greitaeigės maišyklės naudojami ir dezintegratoriai arba dismembratoriai (11.26 pav.).

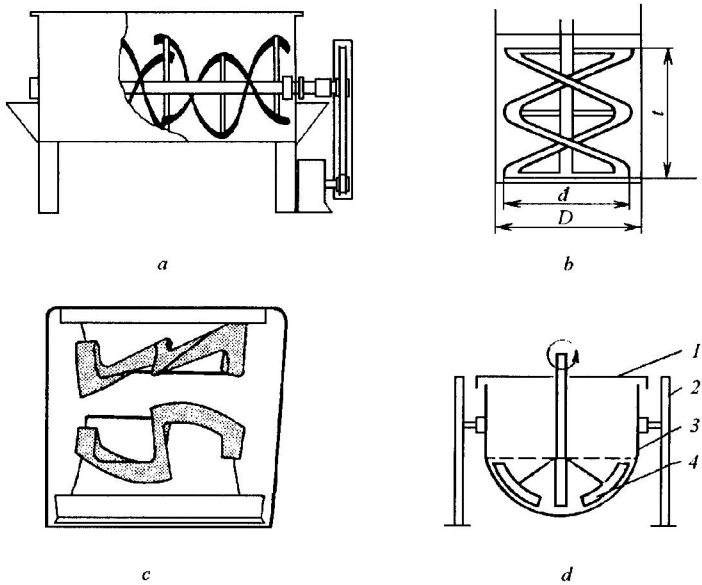
11.8. Plastiškų masių maišytuvai

Maišant plastiškas mases (molio, polimerų, plastikų, glaistų ir kt.), kurių dinaminė klampa yra didelė ($\mu = 5 \cdot 10^2 ... 6 \cdot 10^3$ Pa·s), sunaudojama daug energijos. Maišyklių darbo elementai gaminami iš vandeniui atsparių medžiagų. Maišikliai: sraigtai, mentės, spiralinės juostos, peiliai, rėmai bei sparneliai, daromi masyvūs, platesni ir storesni nei tokiu pat principu veikiančių maišyklių, skirtų skystoms arba birioms medžiagoms maišyti.

Palyginti nedidelės plastiškų medžiagų porcijos sumaišomos *periodinėse intensyvaus maišymo* maišyklėse su sunkiais dvigubais *sigma pavidalo peiliais, dvigubais planetiniais, spiraliniais juostiniais, mentiniais bei bėgūniniais* maišikliais (11.90 pav.). Maišikliai juose turi sudaryti sudėtingos trajektorijos maišomų medžiagų srautus; jų ašys gali būti horizontalios arba vertikalios.

Sumaišyta medžiaga iškraunama pasukus maišyklės rezervuarą vertikalia kryptimi 120°.

Bėgūninėse maišyklėse plastiškos medžiagos ne tik sumaišomos, sutankinamos, bet, jei reikia, ir sudrėkinamos. Plastiškos masės taip pat gali būti sumaišomos maišymo malūnuose, kurių būgnų viduje tam tikrais kampais yra išdėstyti peiliai, pjaustantys ir karpantys maišomas medžiagas.



11.90 pav. Periodinių maišyklių, skirtų plastiškoms masėms maišyti, principinės schemos: *a* – su spiraliniu juostiniu maišikliu ir horizontaliu velenu, *b* – su spiraliniu juostiniu maišikliu ir vertikaliu velenu, *c* – su dvigubu sigma pavidalo maišikliu, *d* – su mentiniu maišikliu (*1* – dangtis, *2* – stovas, *3* – rezervuaras, *4* – maišiklis)

Nuolatinėse sraigtinėse maišyklėse plastiškos medžiagos ne tik maišomos, bet ir aeruojamos (ypač maisto pramonėje, kai reikia, kad gaminiai būtų akyti), sudrėkinamos (išpurškiant vandenį arba vandens garus) arba sutankinamos (vakuumuojant). Sraigtinės maišyklės būna dvivelenės arba daugiavelenės, gretimi sraigtai sukami priešingomis kryptimis. Kadangi šiose maišyklėse maišomi ploni medžiagos sluoksniai, pasiekiamas didelis maišymo intensyvumas.

11.9. Suspensijų, šlamų ir tešlų maišymas

Suspensijų, šlamų (tirštos grietinėlės konsistencijos suspensijų) ir tešlų ($\mu = 0{,}1...10^2$ Pa·s) maišymo procesai bei įrenginiai taip pat skiriasi, palyginti su nelabai klampių skysčių maišymu. Maišant propeleriniu maišikliu įvairios dinaminės klampos suspensijas arba šlamus, maišyklės dugne ir kitose vietose susidaro vadinamosios užsistovėjimo zonos, kuriuose maišymo procesai beveik nevyksta.

Didesnės dinaminės klampos terpėje net ir greitai sukant vieną propelerinį maišiklį neįmanoma sukurti visoje masėje turbulentinių srautų. *Nedidelis dideliu greičiu* (apie 1000 aps./min) *sukamas maišiklis* su sparneliais arba *ultragarsinis vibratorius* gali sukelti srauto turbulentines arba kirpimo sroves

bei kavitaciją, kad disperguotų agregatus ir trapesnes daleles užsistovėjimo zonose. Tokie papildomi *labai intensyvaus* maišymo įrenginiai gali būti įrengiami ir *suspensijų bei šlamų* laikymo, koregavimo ir naudojimo rezervuaruose medžiagoms nuolat disperguoti.

Vidutinės dinaminės klampos šlamai taip pat yra maišomi *inkariniais, mentiniais ir planetiniais maišikliais*. Jei oras iš maišomų šlamų pašalinamas vakuumavimu, tai kylantys į viršų oro burbuliukai taip pat padeda geriau disperguoti agregatus. Keleto šlamų sistemos sumaišomos rutuliniuose arba didelės amplitudės vibraciniuose malūnuose, kuriuose judanti terpė taip pat padeda geriau disperguoti agregatus.

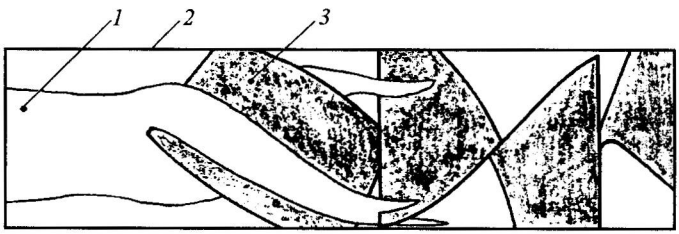
Labai tiršti šlamai ir pseudoplastinės pastos bei tešlos gali būti maišomos *planetiniais, sraigtiniais-juostiniais, sigma* tipo maišikliais bei *valciniais malūnais*. Šie aparatai kartais turi korpuso apvalkalus maišomo mišinio reikiamai temperatūrai palaikyti, kad galima būtų tiksliau kontroliuoti mišinio terpės dinaminę klampą arba kad mišinys neperkaistų.

Labai plačiai naudojamos *mikrojuostinės* maišyklės. Jomis gali būti maišomos dujos, skysčiai, suspensijos, tešlos ir didelės dinaminės klampos plastinės medžiagos. Mikrojuostinės maišyklės yra pranašesnės už kitų tipų maišykles tuo, kad neturi judančių dalių ir medžiaga yra sumaišoma greičiau ir geriau negu atsitiktinių srautų maišyklėse.

Mikrojuostinėse maišyklėse (11.91 pav.) statiniai maišymo elementai – plokštelės yra išdėstomos ir įtvirtinamos cilindriniame vamzdyje taip, kad į maišyklę patenkantis srautas iš pradžių padalijamas į dvi sroves, kurios kitame maišymo elemente padalijamas jau į keturias sroves, o šios savo ruožtu tolesniame maišymo elemente padalijamos jau į aštuonias sroveles ir t. t. Kiekviename maišymo elemente srovelių skaičius didėja eksponentiškai, srovelės vis plonėja ir juostų storis X_s apskaičiuojamas taip:

$$X_s = D_e / 2^n ; \qquad (11.100)$$

čia D_e – vidinis maišymo elemento skersmuo, m; n – maišymo elemento eilės numeris.



11.91 pav. Mikrojuostinės maišyklės veikimo schema: *1* – medžiagos srautas, *2* – cilindras, *3* – maišymo elementas

Maišymo elementai išdėstomi taip, kad padalytos srauto srovelės, susidariusios prieš tai buvusiame elemente, būtų pasukamos priešinga kryptimi ir judėtų ne tik horizontalia, bet ir radialine kryptimi. Dėl tokio judėjimo pobūdžio sraute susidaro kirpimo jėgos, cirkuliacinės srovės, medžiagos dalelės intensyviai ir programiškai maišosi. Nustatyta, kad kas penki maišymo elementai medžiagos dalelė nuo vamzdžio centro nueina kelią iki vamzdžio vidinės sienelės. Be to, ašinį medžiagos maišymąsi sukelia ir nuolat kintantys srauto dalelių greičiai skerspjūvių epiūrose. Šios maišyklės taip pat gali turėti apvalkalus maišomo mišinio temperatūrai reguliuoti.

11.10. Birių medžiagų transportavimas

Pagal veikimo principą transportavimo aparatai skirstomi į dvi grupes:

1) *transporteriai* (juostiniai, plokšteliniai, sraigtiniai, kaušiniai, grandikliniai, ritinėliniai), kuriuose medžiagos judėjimas sukeliamas mechaniniu būdu;

2) *pneumatinio transportavimo aparatai*, kuriuose medžiagos judėjimas sukeliamas oro srautu arba suslėgtu oru padarius medžiagą pseudotakią.

Juostiniai transporteriai (11.92 pav., *a*) naudojami birioms medžiagoms, rečiau milteliams ir gabalinėms medžiagoms, taip pat vienetiniams gaminiams transportuoti horizontalia arba nuožulnia kryptimi judančia begaline juosta.

Plokšteliniai transporteriai (11.92 pav., *b*) naudojami sunkiems, stambiems gabalams arba stambiems vienetiniams gaminiams, taip pat abrazyvioms ir karštoms medžiagoms transportuoti horizontalia arba truputį nuožulnia kryptimi. Jų begalinė juosta sudaryta iš šarnyriškai sujungtų plokščių arba fasoninių plokštelių.

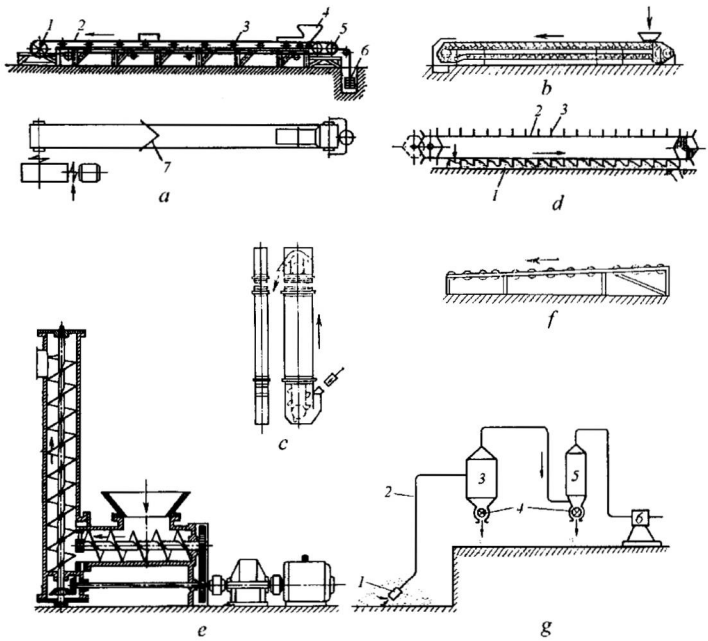
Kaušiniai elevatoriai (11.92 pav., *c*) naudojami birioms medžiagoms transportuoti vertikalia kryptimi arba dideliu kampu į viršų.

Grandikliniai transporteriai (11.92 pav., *d*) mažai abrazyvias medžiagas transportuoja loviu, stumdami jas prie judančios plokštelinės grandinės pritvirtintais grandikliais.

Sraigtiniai transporteriai (11.92 pav., *e*) naudojami birioms ir plastiškoms, klampioms medžiagoms transportuoti horizontalia, nuožulnia, o kartais ir vertikalia kryptimi. Medžiaga juose transportuojama hermetiškame lovyje (su pusapvaliu dugnu) sukamu sraigtu.

Ritinėliniai transporteriai (11.92 pav., *f*) sudaryti iš sukamų arba nesukamų ritinėlių juostų, kuriomis didesni vienetiniai gaminiai transportuojami truputį nuožulnia arba horizontalia kryptimi.

Pneumatinio transporto aparatuose (11.92 pav., *g*) birios pseudotakios būsenos medžiagos, sudarius slėgių skirtumą, vamzdynais arba hermetiškais aeroloviais transportuojamos iš vienos vietos į kitą.



11.92 pav. Pagrindinės transportavimo aparatų schemos: *a* – juostinio transporterio: *1* – varantysis būgnas, *2* – begalinė gumuota juosta, *3* – atraminiai ritinėliai, *4* – medžiagos tiekimo įrenginys, *5* – juostos įtempimo arba varomasis būgnas, *6* – juostos įtempimo įrenginys, *7* – medžiagos nužėrimo peilis; *b* – plokštelinio transporterio; *c* – kaušinio elevatoriaus; *d* – grandiklinio transporterio: *1* – lovys su medžiaga, *2* – plokštelinė grandinė, *3* – grandikliai; *e* – vertikalaus sraigtinio transporterio; *f* – nuožulnaus ritinėlinio transporterio; *g* – įsiurbiamojo pneumatinio transportavimo įrenginio: *1* – įsiurbimo antgalis, *2* – transportavimo vamzdynas, *3* – birių medžiagų atskyrimo ciklonas, *4* – sektorinė iškrovimo sklendė, *5* – oro valymo filtras, *6* – vakuuminis oro siurblys

11.10.1. Transportuojamų medžiagų savybės

Transportavimo procesams turi įtakos šios transportuojamų medžiagų fizikinės-mechaninės savybės: *dalelių dydis ir jų granuliometrinė sudėtis, piltinis tankis, birių medžiagų judrumas* (statinis ir dinaminis laisvojo byrėjimo kampas), *trinties koeficientas, drėgnis, higroskopiškumas, abrazyvumas, aštriabriauniškumas, lipnumas, trapumas, aglomeracija, sušalimas, dulkėtumas, degumas ir sprogumas, įsielektrinimas.*

Pagal *dydį* transportuojamos medžiagos skirstomos į dulkių pavidalo (dalelių dydis < 0,05 mm), miltelių pavidalo (0,05...0,5 mm), smulkiagrūdes

(0,5...2 mm), stambiagrūdes (2...10 mm), smulkių gabalų (11...60 mm), vidutinio dydžio gabalų (61...160 mm), stambių gabalų (160...320 mm) ir labai stambių gabalų (320...500 mm). Stambesni kaip 500 mm dydžio luitai prieš transportavimą dažniausiai smulkinami.

Jei medžiagos gabalas trimis kryptimis yra skirtingų dydžių a_1, a_2 ir a_3, tai *vidutinis skaičiuojamasis jo dydis* nustatomas taip:

$$a = \sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \,. \qquad (11.101)$$

Gabalai, kurių dydis nuo a_{max} iki $0{,}8 \cdot a_{max}$, sudaro *didžiausių gabalų* grupę. Didžiausių gabalų grupės masės m_o ir bendros mėginio masės m santykis nusako *skaičiuojamąjį medžiagos gabalų dydį*:

$$c = m_0 / m \,. \qquad (11.102)$$

Pagal atskirų frakcijų dydžių santykį transportuojamos medžiagos skirstomos į a) *nerūšiuotas*, kai $a_{max}/a_{min} > 2{,}5$, ir b) *rūšiuotas*, kai $a_{max}/a_{min} < 2{,}5$. Rūšiuotųjų medžiagų skaičiuojamasis dalelių dydis

$$a = 0{,}5 \cdot (a_{maks} + a_{min}) \,. \qquad (11.103)$$

Piltinis tankis yra medžiagos masės M ir tos pačios laisvai supiltos medžiagos erdvėje užimamo tūrio santykis V_p:

$$\rho_p = M / V_p \,. \qquad (11.104)$$

Medžiagos piltinis tankis priklauso ne tik nuo paties gabaliuko (arba dalelės) medžiagos tankio, bet ir nuo gabaliukų dydžio, jų granuliometrinės sudėties (erdvės užpildymo medžiaga tankio) bei drėgnio.

Medžiagos, kurių $\rho_p < 600$ kg/m^3, priskiriamos prie *lengvų*, kurių $\rho_p = 600...1600$ kg/m^3, – prie *vidutinio tankio*, kurių $\rho_p = 1600...2000$ kg/m^3, – prie sunkių, o kurių $\rho_p > 2000$ kg/m^3, – prie *labai sunkių*.

Drėgnų medžiagų piltinis tankis ρ_{pw}, kg/m^3, apskaičiuojamas taip:

$$\rho_{pw} = \rho_{ps}(1 - W_a) + W_a \cdot \rho_{H_2O} \,; \qquad (11.105)$$

čia ρ_{ps} – sausos medžiagos piltinis tankis, kg/m^3; W_a – absoliutusis medžiagos drėgnis.

Judrumas – tai birių medžiagų savybė savaime judėti, priklausanti nuo dalelių sankibos jėgų ir vidinės trinties tarp jų dydžio. Bendruoju atveju birios medžiagos pasipriešinimo šlyčiai jėga T, N, nustatoma taip:

$$T = P \cdot f_v + c \cdot F \,; \qquad (11.106)$$

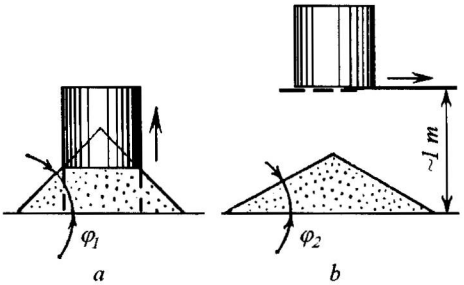
čia P – medžiagos slėgio sudaroma jėga, N; f_v – birios medžiagos vidinės trinties koeficientas ($f_v = tg\varphi_v$); φ_v – vidinės trinties kampas; c – sankibos jėga, N, tenkanti paviršiaus F, pagal kurį vyksta šlytis, ploto vienam kvadratiniam metrui.

Padaliję visus (11.106) lygybės narius iš F, gauname:

$$\tau = \sigma \cdot tg\varphi_T + c\,; \qquad (11.107)$$

čia τ ir σ – tangentiniai ir normaliniai birios medžiagos įtempiai, N/m^2; φ_T – šlyties kampas.

Skiriamos *labai birios medžiagos*, kurių sankibos jėgos yra nedidelės ($c = 0{,}4...1$ kPa) ir *nelabai birios (rišlios)* medžiagos, kurių sankibos jėgos gerokai didesnės (pvz., molių $c = 40...100$ kPa). Judrumas yra labai svarbi medžiagų savybė, pvz., pasirenkant elevatorių kaušų tipą. Tačiau skaitinės sankibos jėgų vertės yra nustatytos tik kai kurių medžiagų (gruntų), todėl daugumos transportuojamų medžiagų judrumas įvertinamas *statiniu laisvo byrėjimo kampu* φ_l (11.93 pav.). Labai birių medžiagų statinis byrėjimo kampas φ_l yra lygus vidinės trinties kampui $\varphi_l = \varphi_v$.



11.93 pav. Medžiagos laisvo byrėjimo kampo nustatymo schemos:
a – nejudančios laisvai supiltos medžiagos (statinio byrėjimo kampas φ_l),
b – judančios laisvai supiltos medžiagos (transportavimo byrėjimo kampas φ_2)

Transportavimo proceso metu medžiagų judrumas geriau apibūdinamas *transportavimo laisvo byrėjimo kampu* φ_2, nes medžiagos ant transporterių juostų tiekiamos iš tam tikro aukščio. Kai medžiaga laisvai byra iš tam tikro aukščio, tai potencinė medžiagos sunkio jėgos energija transformuojasi į papildomą kinetinę medžiagos judėjimo energiją ir taip supiltos medžiagos byrėjimo kampas φ_2 visada būna mažesnis už statinį byrėjimo kampą φ_l, t. y. tas pats medžiagos kiekis pasklinda ant horizontalios plokštumos plačiau). Byrėjimo kampas φ_2 nustatomas išberiant standartinį medžiagos kiekį (1 dm^3) iš 1 m aukščio. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad šiomis sąlygomis

$$\varphi_2 \approx 0{,}7 \cdot \varphi_1 . \qquad (11.108)$$

Subertų rišlių medžiagų paviršiaus sudaromoji nėra tiesė, todėl ir byrėjimo kampo φ_1 vertė įvairiuose paviršiaus sudaromosios kreivės taškuose yra skirtinga. Šiais atvejais nustatomo *vidutinio statinio byrėjimo kampo* φ_1 vertės yra didesnės už vidinės trinties kampo φ_v vertes ir priklauso nuo medžiagos supylimo pobūdžio:

a) supilant medžiagą pamažu,

$$\overline{\varphi}_1 = arctg\left(tg\varphi_v + c/\sigma\right); \qquad (11.109)$$

b) supilant visą medžiagą iš karto (griūtimi),

$$\overline{\varphi}_1 \approx arctg \frac{\sigma \cdot tg\varphi_v}{\sigma - 4{,}7 \cdot c\sqrt{tg\varphi_v}} . \qquad (11.110)$$

Iš šių lygčių matome, kad φ_1 priklauso nuo normalinio įtempio σ dydžio, kuris savo ruožtu yra laisvai arba griūtimi supilant susidarančio kūgio aukščio funkcija. Tai ir nulemia supiltos rišlios medžiagos kūgio paviršiaus sudaromosios netiesinį pobūdį.

Išorinės trinties, atsirandančios tarp transportuojamos medžiagos ir transportavimo įrenginių darbinių paviršių, *trinties koeficiento f* vertė priklauso ne tik nuo pačių medžiagų rūšies, bet ir nuo to, ar medžiaga yra ramybės būsenos, ar juda kartu su transportavimo įrenginiu. Jo skaitinės vertės nustatomos eksperimentiškai. Nustatyta, kad išorinės trinties koeficientas tiesiogiai priklauso nuo medžiagos vidinės trinties koeficiento dydžio. Apytiksliams skaičiavimams galima imti, kad medžiagų trinties į plieną koeficientas (ramybės būsenos) $f_{pl} = 0{,}75 \cdot tg\varphi_v$, į gumuotą juostą $f_g = 0{,}85 \cdot tg\varphi_v$ ir į betoną $f_b \approx tg\varphi_v$.

Kai kurių medžiagų ρ_p, φ_1, φ_2 skaitinės vertės pateiktos 11.4 lentelėje.

11.4 lentelė. Transportuojamų medžiagų savybės

Eil. Nr.	Medžiaga	Piltinis tankis ρ_p, kg/m^3	Laisvo byrėjimo kampas		Trinties koeficientas f į nejudantį		
			nejudant φ_1	judant φ_2	plieną	medį	gumą
1.	Smulkus antracitas	800...950	45	27	0,84	0,84	-
2.	Smulkus gipsas	1200...1400	40	-	0,78	-	0,82
3.	Smulkus sausas molis	1000...1500	50	40	0,75	-	-
4.	Sausa grunto žemė	1200	45	30	1,0	-	-
5.	Formavimo žemė	1250...1300	45	30	0,71	-	0,61

11.4 lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Medžiaga	Piltinis tankis ρ_p, kg/m^3	Laisvo byrėjimo kampas		Trinties koeficientas f į nejudantį		
			nejudant φ_1	judant φ_2	plieną	medį	gumą
6.	Sausi pelenai	400...600	50	40	0,84	1,0	-
7.	Negesintos smulkios kalkės	1200...1500	-	30	0,56	0,7	-
8.	Koksas	360...530	50	35	1,0	1,0	-
9.	Pjuvenos	160...320	39	-	0,8	-	0,65
10.	Sausas smėlis	400...650	45	30	0,8	-	0,56
11.	Sausos gabalinės durpės	330...410	45	40	0,75	0,8	-
12.	Sausas cementas	1000...1300	50	35	0,65	-	0,64
13.	Sausa skalda	1800	45	35	0,63	-	0,60
14.	Kviečiai	650...830	25	35	0,58	0,58	0,50

Parenkant birių medžiagų transportavimo įrenginio tipą, taip pat būtina atsižvelgti į šias medžiagų savybes: abrazyvumą, aštriabriauniškumą, lipnumą, trapumą, autoheziją ir adheziją.

Abrazyvumas – tai kietų medžiagų savybė intensyviai dilinti, trinti kitos medžiagos liečiamąjį paviršių, esant santykiniam judančių paviršių greičių skirtumui. Nemaža dalis cheminėje technologijoje naudojamų gamtinių žaliavų, susmulkintų uolienų ir statybinių medžiagų pasižymi abrazyvumu, todėl joms transportuoti būtina pasirinkti tokius įrenginius, kuriuose transportavimo metu *šios medžiagos neslysta darbiniais paviršiais* (pvz., abrazyvių medžiagų negalima transportuoti pneumatiniu transportu). *Aštriabriauniškumu* pasižymi vidutinio dydžio ir stambios gabalinės medžiagos, ypač išgaunamos sprogdinimu. Tokių medžiagų negalima transportuoti juostiniais transporteriais su nepakankamo paviršinio kietumo gumuotomis juostomis.

Lipnumas būdingas drėgnoms, plastiškoms arba šlapioms medžiagoms (betonams, moliams, skiediniams ir pan.). Jos iš transportavimo įrenginio turi būti iškraunamos mechaniniais būdais.

Trapumu, t. y. savybe staigiai suirti dėl dinaminės apkrovos, smūgio poveikio, pasižymi polimineralinės medžiagos (stiklas, keraminės medžiagos, kai kurios gamtinės uolienos). Kraunant ir transportuojant šias medžiagas, reikia išvengti jų kritimo iš didesnio aukščio, smūginių apkrovų.

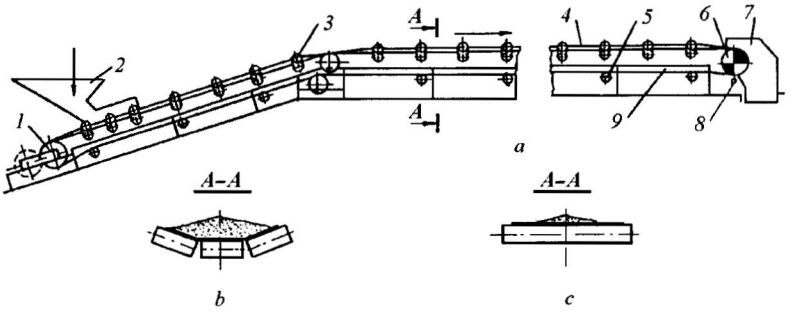
Autohezinėmis bei adhezinėmis savybėmis pasižymi visos medžiagos, susmulkintos iki labai smulkių miltelių pavidalo.

Transportuojamų medžiagų autohezinės ir adhezinės sąveikos jėgos didėja, didėjant slėgiui, drėgmei, veikiant vibracijoms, kratant medžiagas ir išlaikant jas nepalankiomis sąlygomis ilgesnį laiką.

Jei drėgnos medžiagos transportuojamos esant neigiamai aplinkos temperatūrai, tai transporteriai arba vamzdynai turi būti apšiltinti.

11.10.2. Juostiniai transporteriai

Juostiniai transporteriai (11.94 pav.) sudaryti iš stovo *9*, kurio galuose įtvirtinti du būgnai – *varantysis 6* ir *juostos įtempimo*, arba varomasis, *1*. Begalinė juosta *4* gali būti *lovio pavidalo* (11.94 pav., *b*) ir *plokščia* (11.94 pav., *c*). Ji apjuosia galinius būgnus ir palaikoma viršutinės dalies atraminiais ritinėliais *3* ir apatinės dalies atraminiais ritinėliais *5*.



11.94 pav. Juostinio transporterio schema: *1* – varomasis būgnas, *2* – bunkeris, *3* – viršutinės juostos dalies atraminiai ir šoniniai ritinėliai, *4* – begalinė juosta, *5* – apatinės juostos dalies atraminiai ritinėliai, *6* – varantysis būgnas, *7* – iškrovimo piltuvas, *8* – juostos valymo įrenginys, *9* – stovas

Dažniausiai medžiagos transportuojamos viršutine juostos šaka. Atskirais atvejais jos gali būti transportuojamos apatine juostos šaka, o kai kada gali būti panaudojamos net ir abi juostos šakos medžiagai transportuoti priešingomis kryptimis. Varantįjį būgną per pavarą suka elektros variklis. Birios medžiagos pakraunamos bet kurioje juostos vietoje iš vieno arba iš keleto bunkerių *2*; iškraunamos per varantįjį būgną piltuvu *7* arba bet kurioje transporterio vietoje specialiais iškrovimo įrenginiais. Nuo juostos valymo įrenginiu *8*, įtaisytu varančiojo būgno apačioje, nuvalomos prilipusios transportuojamos medžiagos dalelės.

Juostinių transporterių našumas būna 500...1000 t/h, o kai kada ir gerokai didesnis, pvz., stambiuose karjeruose ekskavatorių konvejerių našumas būna 16000...18000 t/h. Didelio našumo juostinių transporterių darbinės šakos skerspjūvis paprastai būna lovio formos. Ji sudaroma, nuožulniai pastačius atraminius ritinėlius. Tuščioji juostos šaka ir šiuo atveju lieka plokščia. Kad juosta darbo metu neslinktų į šonus, kai kada pastatomi šoniniai palaikomieji ritinėliai.

Pagal juostos trasą juostiniai transporteriai skirstomi į *horizontaliuosius, nuožulniuosius ir sudėtinius.* Kad transportuojama medžiaga transportavimo metu neslinktų atgal, didžiausias nuožulniųjų transporterių su lygiu gumuotos juostos paviršiumi pasvirimo kampas turi būti ne didesnis kaip 2/3 medžiagos laisvo byrėjimo kampo φ_2 judant. Kai kurių medžiagų didžiausi transporterio pasvirimo kampai nurodyti 11.5 lentelėje.

11.5 lentelė. Didžiausi plokščiojo juostinio transporterio pasvirimo kampai

Eil. Nr.	Medžiaga	α_{max}	Eil. Nr.	Medžiaga	α_{max}
1.	Plautas rūšiuotas žvyras	12	7.	Šlapias akmens anglių šlakas	22
2.	Akmens anglys	17...22	8.	Smulkios kalkės	23
3.	Grūdai	18	9.	Formavimo žemė	24...26
4.	Nerūšiuota akmens skalda	18	10.	Šviežios medžio pjuvenos	27
5.	Sausas smėlis	18	11.	Šlapias smėlis	27
6.	Cementas	20			

Juostiniams transporteriams naudojamos guminės tekstile arba plienu armuotos juostos bei *plieninės ir vielos tinklo juostos.* Transporterių juostos turi būti stiprios, lengvos, lanksčios, mažai higroskopiškos, mažai tįstančios ir mažai dylančios. Geriausiai šiuos reikalavimus atitinka tekstile armuotos juostos. *Guminės juostos* sudarytos iš keleto 3...14 mm storio stipraus audinio sluoksnių, tarpusavyje sujungtų vulkanizuota guma. Juostų audinys skirtas transportuojamos medžiagos apkrovos įtempiams atlaikyti, o guma – audiniui apsaugoti nuo drėgmės, mechaninių sužalojimų ir per greito išdilimo. Bendros paskirties guminės juostos gali būti naudojamos, esant aplinkos temperatūrai nuo -15 °C iki +60 °C. Kai aplinkos temperatūra žemesnė kaip -15 °C, guma tampa trapi, todėl transporteriams turi būti naudojamos šalčiui atsparios (iki -60 °C) juostos. Kai aplinkos temperatūra iki +100 °C, naudojamos juostos su šilumai atsparios gumos danga ir su termoizoliacinių medžiagų pasluoksniu po ja. Kai kurių polimerinių pluoštų audiniai yra ne tik stipresni už medvilninius, bet ir atsparūs drėgmės bei aukštų temperatūrų poveikiui (pvz., lavsano audiniai gali būti naudojami esant +150 °C temperatūrai).

Juostos guma taip pat turi būti atspari tepalams ir, jei transportuojamos neįpakuotos maisto medžiagos, be kenksmingų medžiagų (švino, arseno, gyvsidabrio ir kt.) priemaišų.

Labai našiems ir didelių transportavimo nuotolių transporteriams naudojamos ypač stiprios juostos. Šios juostos gaminamos iš labai stipraus polimerinio pluošto audinių (nailono, amido, kaprono ir kt.) arba įvulkanizuojant į jas plieninius 1,2...4 mm skersmens lynus.

Transporterio našumui padidinti kartais naudojamos juostos su 50...80 mm aukščio guminiais bortais.

Transporterio pasvirimo kampui padidinti naudojamos juostos, turinčios įvairių iškilimų arba rifliuotą darbinį paviršių. Tokių juostų didžiausias trūkumas – sunku nuvalyti prilipusią medžiagą.

Serijinių juostinių transporterių gumuotos juostos būna nuo 400 iki 2000 mm pločio, jų judėjimo greičiai nuo 0,8 iki 4 m/s; specialios paskirties transporterių (pvz., ekskavatorių) juostos būna nuo 1200 iki 3000 mm pločio, judėjimo greičiai – iki 8 m/s. Juostos stiprumas priklauso nuo jos pločio, audinių stiprumo ir jų sluoksnių skaičiaus, audinio stiprumo atsargos koeficientas k_a būna nuo 9 iki 11. Tokia didelė stiprumo atsarga reikalinga tam, kad juosta eksploatacijos metu neištįstų. Gumuotos juostos tankis ρ_j būna nuo 1000 iki 1100 kg/m^3. Labai ilgi transporteriai įrengiami, sujungus į vieną liniją keletą atskirų transporterio grandžių.

Plieninės juostos mechaniškai yra labai stiprios, atsparios dilimui ir aukštai (iki +350 °C) temperatūrai. Jos gaminamos iš manganu legiruotų arba nerūdijančiųjų plienų. Juostų storis būna nuo 0,6 iki 1,2 mm, o plotis nuo 350 iki 800 mm. Plieninėmis juostomis galima transportuoti lipnias medžiagas, jos yra pigesnės už gumuotas tekstilines juostas, tačiau jas montuoti ir eksploatuoti yra sunkiau, nes reikia tiksliau centruoti. Be to, naudojant šias juostas, galima mažinti transporterio pasvirimo kampus (iki 14°), reikia didinti būgnų skersmenis, įtaisyti šoninius nejudamuosius bortus, todėl padidėja elektros energijos sąnaudos.

Kartais naudojamos plieninės juostos, iš abiejų pusių padengtos guma.

Tinklinės plieninės juostos naudojamos transporteriams, kurie skirti aštriabriaunėms medžiagoms (skaldai, plytoms, koksui ir pan.) transportuoti.

Šios juostos taip pat naudojamos *rūšiavimo, sijojimo, plovimo, vandens šalinimo aparatuose, džiovyklose, detalių grūdinimo, duonos kepimo ir* kituose aparatuose. Tinklinės juostos būna *pintos ir šarnyrinės*, jos gaminamos iš karščiui atsparaus plieno ir gali dirbti, esant aplinkos temperatūrai iki +1000 °C.

Kai medžiagą juostiniu transporteriu būtina pakelti į didelį aukštį, naudojamos *papildomos prispaudžiamosios juostos*, kurios turi atskirą eigos mechanizmą ir juda sinchroniškai su pagrindine juosta. Papildomos gumuotos juostos prie pagrindinės prispaudžiamos ritinėliais arba jos pačios gaminamos pakankamai sunkios. Tokio tipo transporteriais tarp juostų esantį medžiagos sluoksnį galima pakelti iki 60° kampu, todėl nereikia tokio ilgo transporterio, kokio reikėtų, jei keltume medžiagą viengubu transporteriu mažu kampu.

Juostinių transporterių *būgnai* liejami iš ketaus arba suvirinami iš lakštinio plieno. Juostinių transporterių su gumuotomis juostomis būgnai iš išorės padengiami guma, kuri privulkanizuojama prie būgno per ebonitinį tarpiklį. Dažnai prie būgnų įgilintais varžtais pritvirtinama tokia pat guminė juosta.

Šiomis priemonėmis padidinamas trinties tarp būgno ir juostos koeficientas. Varantieji būgnai centre turi nedidelį strėlės antgalio pavidalo iškilimą (1,5...3,0 mm aukščio) judančiai juostai centruoti.

Varančiojo būgno skersmuo D_v, m, ir ilgis B_v, m, apskaičiuojami pagal guminės juostos audinio sluoksnių skaičių i ir jos plotį B:

$$D_v = k \cdot i\,, \quad k = 0{,}12...0{,}15, \quad B_v = B + 0{,}10\,. \qquad (11.111)$$

Įtempimo būgno skersmuo D_{it} ir kreipiamojo (juostos prispaudimo) būgno skersmuo D_n būna mažesni už varančiojo būgno skersmenį D_v:

$$D_{it} \geq 2D_v/3\,, \quad D_n \geq D_v/2\,. \qquad (11.112)$$

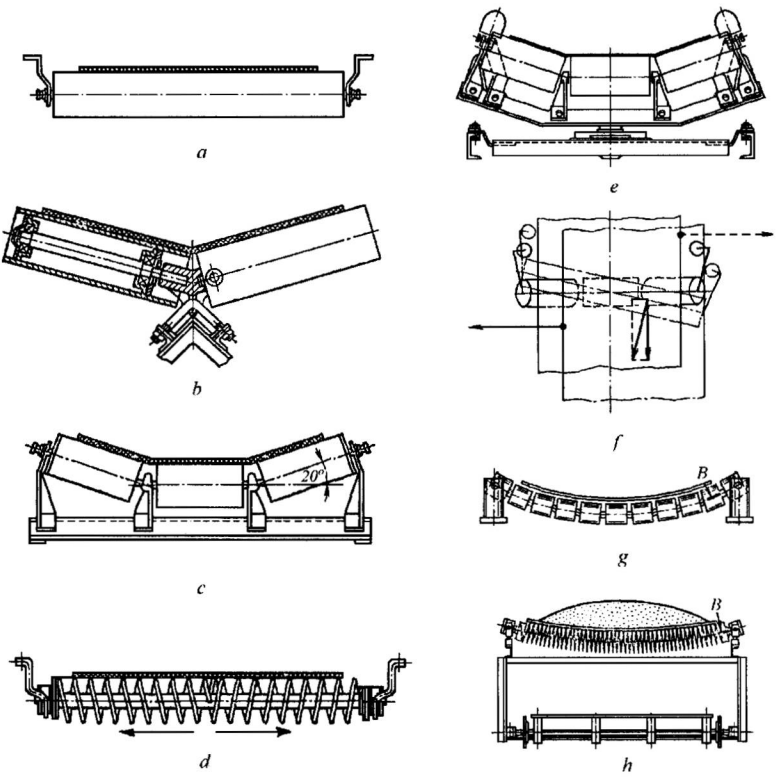
Tiek darbinės linijos, tiek tuščiosios eigos linijos juostos remiasi į *atraminius ritinėlius.*

Gumuotų juostų atraminiai ritinėliai liejami iš ketaus arba medžio drožlių – sintetinių dervų kompozitų.

Ritinėliai naudojami kuo mažesnio skersmens, tačiau jų dydis priklauso nuo juostos pločio ir judėjimo greičio. Per daug sumažinus ritinėlių skersmenį, labai padidėja jų sukimosi greitis ir sumažėja riedėjimo guolių ilgaamžiškumas, todėl, kai juostos plotis B = *800...2000* mm, ritinėlių skersmuo būna 89...194 mm.

Darbinės eigos ritinėlių atrama gali būti vieno ritinėlio arba lovio pavidalo dviejų, trijų arba penkių ritinėlių (11.95 pav., *a* ir *b*, *c*). Tuščiosios eigos juosta visada plokščia. Gumuotos juostos tiesiam ir tolygiam judėjimui užtikrinti atraminiai ritinėliai turi būti išdėstyti transporterio ašiai statmena kryptimi. Kad guminė juosta nepasislinktų į šoną, periodiškai, kas penkta ritinėlių atrama daromos *pasisukančios centruojamosios ritinėlių atramos* (11.95 pav., *e* ir *f*) su viršutiniais kreipiamaisiais ritinėliais, kurie į šoną slenkančią juostą grąžina į pirmykštę ašinę padėtį. Darbinėje transporterio juostos dalyje ritinėlių atramos įrengiamos kas 1,2...1,4 m. Medžiagų pakrovimo zonose ritinėlių atramos įrengiamos tankiau – kas 0,4...0,5 m, o patys ritinėliai dinaminėms apkrovoms amortizuoti daromi gumuotais briaunuotais paviršiais. Tuščiosios eigos juostos dalyje ritinėlių atramos išdėstomos rečiau – kas 2,5...3 m. Šioje dalyje taip pat įrengiama keletas ritinėlių su *sraigtiniais paviršiais* prilipusiai transportuojamai medžiagai nuvalyti nuo juostos (11.95 pav., *d*).

Transporterių su plienine juosta ritinėlių atramas sudaro riedėjimo guoliuose sumontuotos besisukančios mažo žingsnio spyruoklės, kurios darbinio juostos judėjimo metu išsilenkia lėkšta parabole. Gali būti naudojamos ir *kabamosios atramos*, sudarytos iš guminių arba plastikinių ritinėlių, sumontuotų ant lankstaus gumuoto plieninio lyno (11.95 pav., *g* ir *h*). Tokios ritinėlių atramos gerai centruoja judančią plieninę juostą, yra atsparios abrazyviniam dilimui.



11.95 pav. Juostinių transporterių ritinėlių atramos: *a* – vieno ritinėlio, *b* – lovio formos dviejų ritinėlių, *c* – lovio formos trijų ritinėlių, *d* – tuščiosios eigos su sraigtiniais valančiaisiais paviršiais, *e* – centruojamoji ritinėlių atrama (*f* – veikimo schema), *h* – kabamoji plieninės juostos atrama, *g* – spyruoklinė plieninės juostos atrama

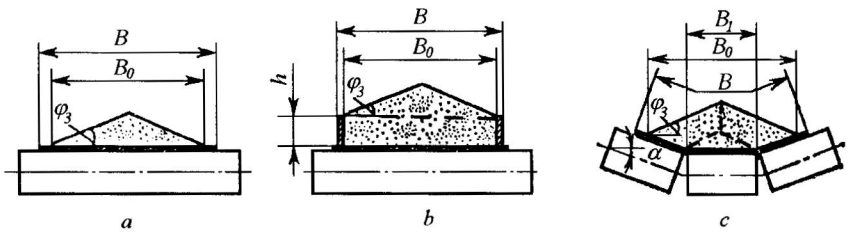
Juostinių transporterių skaičiavimai. *Horizontaliojo* juostinio transporterio našumas, m^3/s arba kg/s, apskaičiuojamas pagal debito lygtis:

$$V_v = F \cdot w,\ V_m = F \cdot w \cdot \rho_p; \qquad (11.113)$$

čia F – medžiagos, esančios ant judamosios transporterio juostos, skerspjūvio plotas, m^2; w – juostos judėjimo greitis, m/s; ρ_p – transportuojamos medžiagos piltinis tankis, kg/m^3.

Kadangi transportuojamos medžiagos kiekis žinomas, o juostos judėjimo greitis priklauso nuo transportuojamų medžiagų savybių, tai dažniausiai reikia nustatyti reikalingą medžiagos srautui skerspjūvio plotą F ir reikalingą juos-

tos plotį B. Dažniausiai medžiaga juostiniais transporteriais transportuojama ant plokščių su bortais ir lovio pavidalo juostų (11.96 pav.).



11.96 pav. Medžiagos, esančios ant judamųjų juostinių transporterių juostų, skerspjūvio ploto nustatymas: *a* – plokščia, *b* – plokščia su bortais, *c* – lovio pavidalo juosta

Apskaičiuojant ant judamosios transporterio juostos pasklidusios birios medžiagos skerspjūvio plotą, tariama, kad skerspjūvis yra trikampio pavidalo, o jo pagrindo kampas $\varphi_3 \approx 0{,}5$, $\varphi_2 \approx 0{,}35 \cdot \varphi_1$ (11.5 lentelė). Judant horizontaliojo juostinio transporterio plokščiajai juostai, $B_o \approx 0{,}8 \cdot B$. Šiomis sąlygomis horizontaliojo transporterio skerspjūvio plotas F_h, m^2, ir juostos plotis B, m, yra susieti šia priklausomybe:

$$F_h = 0{,}16 \cdot B^2 \cdot tg\varphi_1 . \qquad (11.114)$$

11.6 lentelė. Medžiagos sumažėjimo ant judamojo nuožulniojo transporterio koeficiento k vertės

Eil. Nr.	Transporterio pasvirimo kampas	Koeficientas k
1.	< 10	1,00
2.	12...15	0,97
3.	16...20	0,90
4.	21...22	0,85

Apskaičiuojant *nuožulniojo* juostinio transporterio su plokščiaja juosta našumą V_p ir medžiagos skerspjūvio plotą F_p, reikia atsižvelgti į tai, kad, judant transporterio juostai į viršų, dalis birios medžiagos rieda žemyn, todėl medžiagos skerspjūvio plotas ir transporterio našumas sumažėja:

$$V_p = k \cdot F \cdot w ; \qquad (11.115)$$

čia k – koeficientas, įvertinantis žemyn nuriedėjusios medžiagos dalį (11.6 lentelė).

Ant nuožulniojo transporterio judamosios *plokščiosios* juostos esančios biriosios medžiagos skerspjūvio plotas apskaičiuojamas taip:

$$F_p = 0,25 \cdot k \cdot K^2 \cdot B^2 \cdot tg \cdot \varphi_3 ; \qquad (11.116)$$

čia $K = B_0 / B$.

Daugumos transportuojamų biriųjų medžiagų skerspjūvio pagrindo kampas $\varphi_3 = 15°$ ($tg\varphi_3 = 0,27$), transporterio pasvirimo kampas neviršija 15° ($k = 0,97$), o $K = B_0/B = 0,85$. Šiomis sąlygomis

$$F_p = 0,25 \cdot 0,97 \cdot 0,85^2 \cdot 0,27 \cdot B^2 = 0,05 \cdot B^2 . \qquad (11.117)$$

Ant plokščiosios juostos su *šoniniais bortais* (11.96 pav., *b*) esančios biriosios medžiagos skerspjūvio bendras plotas $F_{p.b}$ susideda iš trikampio ploto F_p' ir stačiakampio ploto F_p''. Stačiakampio aukštį h galime išsireikšti kraštinių santykiu $\varepsilon = h/B$, iš kurio $h = \varepsilon \cdot B$. Tada nuožulniojo juostinio transporterio su šoniniais bortais $F_{p.b}$ ir B yra susiję šia lygtimi:

$$F_{p.b} = F_p' + F_p'' = 0,25 \cdot k \cdot K^2 \cdot B^2 tg\varphi_3 + K \cdot \varepsilon \cdot B^2 = \\ = (0,25 \cdot k \cdot K^2 \cdot tg\varphi_3 + K \cdot \varepsilon \cdot) \cdot B^2 . \qquad (11.118)$$

Apytiksliams skaičiavimams galima naudotis lygtimi

$$F_{p.b} = (K \cdot \varepsilon + 0,05) \cdot B^2 . \qquad (11.119)$$

Ant nuožulniojo *lovinio* transporterio judamosios juostos esančios biriosios medžiagos skerspjūvio plotą F_ℓ galime lakyti dviejų lygiašonių trapecijų ir vidurinio trikampio plotų (11.96 pav., *c*) suma. Pažymėję $B_o = k \cdot B$ ir $B_1 = K_1 \cdot B$, gauname:

$$F_\ell = 0,25 \cdot B^2 \cdot [k \cdot K^2 \cdot tg\varphi_3 + (K^2 - K_1^2) \cdot tg\alpha] , \qquad (11.120)$$

kai $k = 0,97$, $\varphi_3 = 15°$, $K = 0,8$ ir $K_1 = 0,38$, gauname apytiksles lygtis F_ℓ, m^2, apskaičiuoti:

a) $F_\ell \approx 0,11 \cdot B^2$ (kai $\alpha = 20°$), (11.121)

b) $F_\ell \approx 0,14 \cdot B^2$ (kai $\alpha = 30°$). (11.122)

Guminių juostų optimalusis judėjimo greitis būna: a) $w = 1...4$ m/s, transportuojant birias medžiagas, b) $w = 0,5...1,5$ m/s, transportuojant vienetinius gaminius. Žinant reikalingą transporterio našumą, pagal (11.113)...(11.122) lygtis apskaičiuojamas transporteriui reikalingos juostos plotis B. Transportuojant gabalines ir vienetines medžiagas, juostos plotį B, apskaičiuotą pagal šias lygtis, būtina patikrinti pagal jų maksimalius matmenis a_{max}, m,

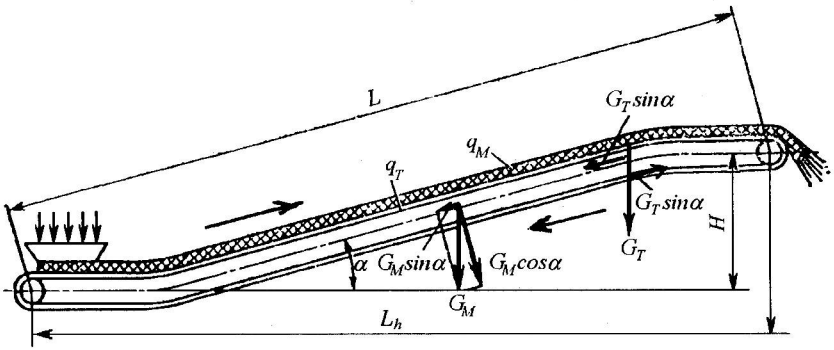
a) nerūšiuotoms medžiagoms $B \geq 2a_{max} + 0{,}2$, (11.123)

b) rūšiuotoms medžiagoms $B \geq 3{,}3a_{max} + 0{,}2$, (11.124)

c) vienetiniams gaminiams $B \geq a_{max} + 0{,}1$. (11.125)

Atlikus šiuos skaičiavimus, pasirenkamas artimiausias standartinis reikalingas gumuotosios juostos plotis B: 400; 500; 650; 800; 1000; 1200; 1400; 1600; 2000; 2500 mm. Jose sintetinių audinio sluoksnių skaičius $i = 3...6$, santykinis juostos pailgėjimas, esant 0,1 juostos skaičiuojamojo stiprio apkrovos, būna 3...4 %.

Juostiniams bei grandininiams transporteriams reikalingo elektros variklio galios nustatymas. Nuožulnaus transportavimo šiais transporteriais atveju veikiančių jėgų schema pavaizduota 11.97 pav.



11.97 pav. Juostinių ir grandininių transporterių traukos įtaisui reikalingos galios nustatymo schema

Transportavimo metu energija naudojama: 1) ant transporterio esančios medžiagos sunkio jėgai nugalėti, pakeliant medžiagą į aukštį H (N_H); 2) pasipriešinimams ritinėlių atramose, kurie atsiranda dėl transportuojamos medžiagos judėjimo horizontalia kryptimi atstumu L_h, nugalėti (N_l); 3) uždaro kontūro transporterio juostos judėjimo metu atsirandantiems pasipriešinimams ritinėlių atramose (tuščiosios eigos) nugalėti (N_o); 4) medžiagos nužertuvų (jei medžiaga nuimama ne transporterio gale) sukeliamiems pasipriešinimams nugalėti (N_n); 5) elektros variklio jėgos perdavimo mechanizmuose (reduktoriuose ir pavarose) atsirandantiems pasipriešinimams nugalėti (η).

Bendrą pasipriešinimo transporterio su medžiaga judėjimui jėgą G galime nustatyti, išnagrinėję sunkio jėgų dedamųjų dydžius (11.97 pav.). Kai transporterio ilgis L, m, o ant transporterio juostos vieno ilginio metro esan-

čios medžiagos masė q_M, kg/m, bendra ant viso transporterio esančios transportuojamos medžiagos sunkio jėga G_M:

$$G_M = q_M \cdot L \cdot g ; \qquad (11.126)$$

čia $g = 9{,}81$ m/s^2.

Analogiškai nustatoma ir pačios transporterio juostos, kurios ilgis $2L$, sunkio jėga G_T:

$$G_T = 2 \cdot L \cdot q_T \cdot g . \qquad (11.127)$$

Kadangi transporterio juostos viršutinės dalies sunkio jėgos dedamoji $G_T \cdot \sin\alpha$ beveik yra išlyginama besileidžiančios apatinės juostos dalies priešingos krypties sunkio jėgos dedamosios (11.97 pav.), tai bendra transporterio su medžiaga pasipriešinimo judėjimui jėga G, kG:

$$G = G_M \cdot \sin\alpha + G_M \cdot \cos\alpha \cdot \omega_c + G_T \cdot \cos\alpha \cdot \omega_c ; \qquad (11.128)$$

čia ω_c – bendras pasipriešinimo transporterio judėjimui koeficientas, įvertinantis tai, kad sunkio jėgų dedamųjų $G_M \cdot \cos\alpha$ ir $G_T \cdot \cos\alpha$ poveikis sumažėja, perduodant judesį riedėjimo arba šliaužimo trintimi.

Eksperimentiškai nustatytos ω_c vertės pateiktos 11.7 lentelėje.

11.7 lentelė. Pasipriešinimo juostinių ir grandininių transporterių judėjimui koeficiento ω_c vertės

Eil. Nr.	Transporterio juostos arba grandinių judėjimo tipas	ω_c
1.	Juostos judėjimas ritinėlių atramomis su riedėjimo guoliais	0,025...0,03
2.	Grandinės slydimas kreipiamuoju loviu	0,3...0,4
3.	Grandinės judėjimas atraminiais ratukais	
	a) su slydimo guoliais	0,08...0,12
	b) su riedėjimo guoliais	0,03...0,04

Apskaičiavus jėgos G dydį, galima rasti transporterio traukos įtaisui reikalingą galią N, kW:

$$N = 9{,}81 \cdot G \cdot w / 1000 = \\ = 9{,}81 \cdot 10^{-3} \cdot w \cdot [G_M \cdot \sin\alpha + G_M \cdot \cos\alpha \cdot \omega_c + G_T \cdot \cos\alpha \cdot \omega_c]. \qquad (11.129)$$

čia 9,81 – perskaičiavimo koeficientas: 1 kG·m = 9,81 J; w – transporterio juostos (arba grandinių) judėjimo greitis, m/s.

Įrašę į šią lygtį G_M ir G_T išraiškas iš (11.126) ir (11.127) lygčių, gauname *pagrindinę lygtį transporterių traukos įtaiso reikalingai galiai nustatyti:*

$$N = 9{,}81 \cdot 10^{-3} [w \cdot q_M \cdot L_g \sin\alpha + \\ + w \cdot q_M \cdot L_g \cdot \omega_c \cdot \cos\alpha + 2 \cdot w \cdot L \cdot q_T \cdot g \cdot \omega_c \cdot \cos\alpha]. \quad (11.130)$$

Kadangi $L \cdot \sin\alpha = H$; $L \cdot \cos\alpha = L_h$, o esant nenutrūkstamam transportuojamos medžiagos srautui

$$q = F \cdot \rho_p, \quad (11.131)$$

tai (11.130) lygtį galime užrašyti taip:

$$N = 9{,}62 \cdot 10^{-2} \cdot Q_M \cdot H + \\ + 9{,}62 \cdot 10^{-2} \cdot Q_M \cdot L_h \cdot \omega_c + 0{,}193 \cdot Q_T \cdot L_h \cdot \omega_c, kW; \quad (11.132)$$

čia $Q_M = w \cdot F \cdot \rho_p$ – transporterio našumas, kg/s; H – medžiagos pakėlimo aukštis, m; L_h – transporterio projekcijos į horizontaliąja ašį ilgis, m; $Q_T = w \cdot F \cdot \rho_T$ – transporterio judamųjų dalių (juostos arba grandinių) masė, praslenkanti transporteryje per vieną sekundę ($F_T = B \cdot \delta$, m^2; ρ_T = *1000...1100* kg/m^3 – gumuotosios transporterio juostos tankis), kg/s.

Pirmasis (11.132) lygties narys rodo galią (N_H), reikalingą transportuojamai medžiagai pakelti į aukštį H; *antrasis* – galią (N_L), reikalingą medžiagai transportuoti horizontalia kryptimi atstumu L_h, o *trečiasis* – galią (N_o), reikalingą transporterio judamųjų dalių (juostos, grandinių) judėjimui horizontalia kryptimi, t. y. transporterio tuščiajai eigai reikalingą galią. Jei medžiaga nukraunama nuo transporterio ne jo gale, tai reikia įvertinti dar ir nukrovimo nužertuvų (plokščių arba plūgelio tipo) sunaudojamą galią N_n.

Įrašę į (11.132) lygtį $\omega_c = 0{,}03$ (žr. 11.8 lentelę), gauname *bendras išraiškas juostinių transporterių traukos įtaisui reikalingai galiai* N_j, kW, apskaičiuoti:

a) kai medžiaga nubyra transporterio gale,

$$N_j = 9{,}62 \cdot 10^{-2} \cdot Q_M \cdot H + \\ + 2{,}89 \cdot 10^{-3} \cdot Q_M \cdot L_h + 5{,}79 \cdot 10^{-3} \cdot Q_T \cdot L_h; \quad (11.133)$$

b) kai medžiaga nukraunama bet kurioje transporterio vietoje plokščiuoju nukrovimo įtaisu (įstrižuoju žertuvu),

$$N_j = 9{,}62 \cdot 10^{-2} \cdot Q_M \cdot H + 2{,}89 \cdot 10^{-3} \cdot Q_M \cdot L_h + \\ + 5{,}79 \cdot 10^{-3} \cdot Q_T \cdot L_h + 2{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot Q_M \cdot B; \quad (11.134)$$

čia B – gumuotosios juostos plotis, m.

Tuomet juostiniam transporteriui reikalingo elektros variklio galia N_v, kW,

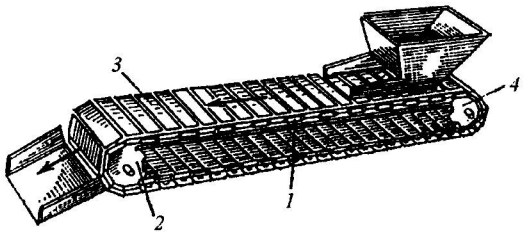
$$N_v = \frac{N_j}{\eta} = \frac{N_H + N_L + N_o + N_n}{\eta}; \qquad (11.135)$$

čia η – bendras elektros variklio ir jėgos perdavimo mechanizmų (krumpliaratinių arba diržinių pavarų) naudingumo koeficientas ($\eta = 0{,}6...0{,}8$).

11.10.3. Grandininiai transporteriai

Grandininių transporterių traukiamasis elementas yra ne begalinė juosta, o iš pailgų, šarnyriškai sujungtų plokštelių grandžių sudaryta begalinė grandinė. Dažniausiai grandininiuose transporteriuose naudojamos dvi šoninės lygiagrečiosios grandinės, tačiau jei transporteriai siauri (iki 400 mm pločio) gali būti naudojama ir viena grandinė. Grandinės yra traukiamos krumplinių (krumplių $n = 6...8$) žvaigždučių. Dažniausiai naudojamos plokštelinės grandinės su įvorėmis ir ratukais, kurie rieda plieniniu lovinio profilio kampuočiu arba bėgiais, pritvirtintais prie transporterio rėmo, rečiau – plokštelinės grandinės su įvorėmis ir ritinėliais arba grandinės be įvorių (su neardomaisiais grandžių sujungimais). Grandinių plokštelės ir įvorių velenėliai gaminami iš geros kokybės plienų. Žvaigždutės liejamos iš plieno, ketaus arba daromos iš lieto ketaus korpuso ir plieninio vainiko.

Plokštelinių transporterių (11.98 pav.) begalinė juosta sudaryta iš metalinių plokštelių *3*, pritvirtintų prie šoninių grandinių *1*. Grandinės tempiamos varančiosiomis žvaigždutėmis *2* ir įtempiamos sraigtiniais įrenginiais įtempimo žvaigždutėmis *4*. Transporterio juostą sudarančios plonesnės metalinės plokštelės štampuojamos iš plieno lakštų (lengvųjų transporterių), stipresnės, storesnės plokštelės išliejamos iš plieno arba ketaus (sunkiųjų transporterių). Plokštelių skerspjūvio profilis gali būti lygus, banguotas arba dėžutės pavidalo. Biriosioms medžiagoms transportuoti skirtų transporterių plokštelės užeina viena ant kitos, sudarydamos ištisinę juostą.



11.98 pav. Plokštelinis transporteris: *1* – begalinė grandinė, *2* – varančioji žvaigždutė, *3* – plokštelės, *4* – grandinės įtempimo žvaigždutė

Plokšteliniai transporteriai gali būti su paaukštintais šoniniais kraštais, pritvirtintais prie rėmo, arba šoniniai kraštai gali būti pritvirtinti prie plokštelių ir judėti drauge su jomis. Plokštelinės juostos judėjimo greitis būna $w = 0{,}01...1{,}0$ m/s, dažniausiai $w = 0{,}2...0{,}5$ m/s.

Gamtinėms uolienoms transportuoti dažnai naudojami trumpi sunkieji plokšteliniai transporteriai (juostos plotis $B = 0{,}4...1{,}6$ m, o transportavimo greitis 0,01...1 m/s), kuriais į trupintuvus tiekiami stambūs (iki 1,2 m dydžio) ir sunkūs aštriabriauniai gabalai.

Plokštelinių transporterių su lygaus paviršiaus plokštelėmis pasvirimo kampas negali būti didesnis kaip 18°, o jei plokštelių profilis banguotas arba dėžutės pavidalo, transporterio pasvirimo kampas gali būti iki 30°. Jei transporteris turi skersines pertvaras, pasvirimo kampas gali būti iki 45°.

Plokštelinių transporterių skaičiavimo principai tokie pat kaip juostinių transporterių.

Nustatant našumą, medžiagos, esančios ant transporterio plokštelinės juostos, srauto skerspjūvio plotas apskaičiuojamas pagal (11.114), (11.117), (11.118), (11.121) ir (11.122) lygtis.

Reikalinga plokštelinio transporterio elektros variklio galia N_v apskaičiuojama iš (11.130) arba (11.132) lygties nustačius N_H, N_L ir N_o galias. Bendras vidutinio ilgio transporterių, kurių ratukuose arba ritinėliuose naudojami riedėjimo guoliai, pasipriešinimo judėjimui koeficientas $\omega_c = 0{,}1 \pm 0{,}02$.

Transporterio tuščiosios eigos reikalingai galiai N_o nustatyti vieno išilginio transporterio juostos metro masę kilogramais apytiksliai galima apskaičiuoti pagal lygtį

$$q_p = B \cdot K_p ; \qquad (11.136)$$

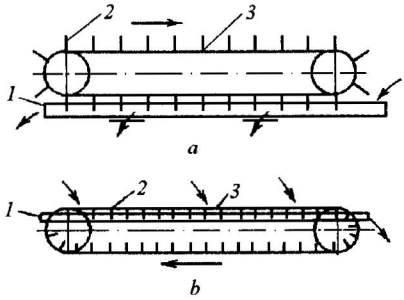
čia B – plokštelinės juostos plotis, m; K_p – lyginamoji plokštelinės juostos 1 m^2 masė, kg/m^2 (lengvųjų transporterių $K_p = 130$, vidutinių $K_p = 160$, o sunkiųjų $K_p = 210$ kg/m^2).

Be to, skaičiuojant N_o, reikia įvertinti ir pačios grandinės vieno išilginio metro masę q_{gr}. Tada

$$q_T = q_p + q_{gr} . \qquad (11.137)$$

11.10.4. Grandikliniai transporteriai

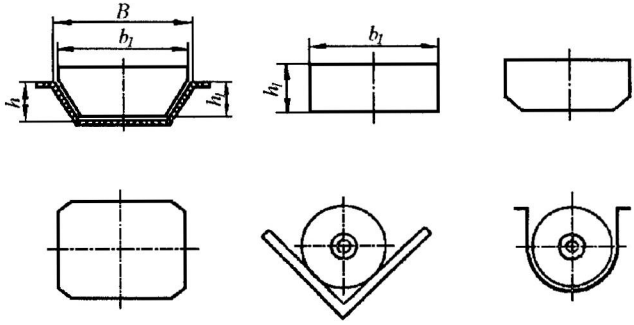
Grandikliniai transporteriai (11.99 pav.) sudaryti iš nejudamojo atviro lovio *1*, išilgai kurio juda begalinė grandinė *3*, prie kurios pritvirtinti grandikliai *2*. Grandikliai prie grandinės gali būti tvirtinami dvejopai (11.99 pav., *a* ir *b*).



11.99 pav. Grandikliniai transporteriai: *a* – su apatine darbine dalimi; *b* – su viršutine darbine dalimi; *1* – nejudamasis lovys, *2* – grandikliai, *3* – begalinė grandinė

Grandiklinių transporterių lovys yra suvirintas iš 4...6 mm storio plieno lakštų. Transporterių grandikliai yra trapeciniai, stačiakampiai, stačiakampiai su nupjautais kampais ir diskiniai (11.100 pav.). Siaurų transporterių (iki 500 mm pločio) grandikliams traukti naudojama viena grandinė, platesnių – dvi grandinės. Tarp grandiklių ir lovio sienelių paliekamas 3...6 mm tarpas. Grandiklių forma turi atitikti nejudamojo lovio skerspjūvio formą. Diskiniams grandikliams traukti vietoj grandinės naudojamas plieninis lynas.

Transportuojamoji medžiaga grandikliais perstumiama loviu ir gali būti iškraunama bet kurioje lovio vietoje pro jame įrengtas angas arba lovio gale.



11.100 pav. Grandiklinių transporterių grandikliai

Grandikliniai transporteriai būna horizontalieji, nuožulnieji arba sudėtingi. Jie lengvesni negu plokšteliniai transporteriai, jų pasvirimo kampas gali siekti 45°, konstrukcija paprasta.

Grandikliniais transporteriais transportuojamos biriosios medžiagos, kurių savybėms nekenkia smulkinimas trintimi transportavimo metu (anglys,

pelenai, šlakai, miltai ir pan.). Jais negalima transportuoti trapių, šlapių ir lipnių medžiagų. Specialių tipų grandikliniais transporteriais galima transportuoti ir kai kuriuos vienetinius krovinius (maišus, dėžes ir pan.).

Transporteriai su *panardintais grandikliais* turi uždarą lovį, kurio apatine dalimi juda transporterio darbinė dalis, o viršutine – tuščiosios eigos dalis. Transportuojant medžiagas tokiais transporteriais, nepatiriama transportuojamos medžiagos nuostolių, neteršiama aplinka, nėra gaisro pavojaus.

Grandiklinių transporterių ilgis siekia iki 100 m, grandiklių judėjimo greitis 0,3...1,0 m/s, našumas iki 150 t/h.

11.10.5. Kaušiniai elevatoriai

Kaušiniais elevatoriais transportuojamos biriosios arba gabalinės medžiagos vertikaliai arba didesniu negu 70° pasvirimo kampu. Pagal darbinio elemento pobūdį elevatoriai yra *kaušinio, lentyninio ir lopšinio* tipo. Lentyniniai ir lopšiniai elevatoriai skirti įvairiems gabaliniams kroviniams (maišams, statinėms, dėžėms ir pan.) transportuoti. Jais krovinius galima ne tik pakelti, bet ir nuleisti žemyn. Elevatoriais medžiagos pakeliamos iki 35 m, jų našumas siekia 100 m^3/h. Cheminėje technologijoje elevatoriai dažniausiai naudojami aukštiems silosams ir bunkeriams pripildyti.

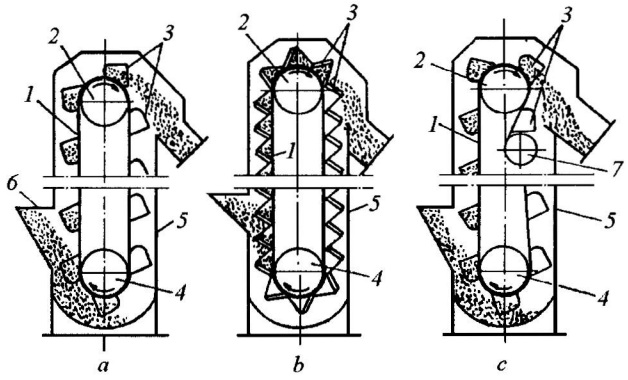
Kaušiniais elevatoriais transportuojamos *biriosios medžiagos*: smėlis, žvyras, trupintos durpės, portlandcemenčio klinkeris, keramzitas, grūdai, miltai ir pan.

Kaušinį elevatorių (11.101 pav.) sudaro begalinė juosta *1* (arba grandinė), varantysis būgnas *2* (arba žvaigždutė) ir įtempimo būgnas *4* (arba žvaigždutė). Prie traukos įtaiso *1* pritvirtinami kaušai *3*. Visa judamoji elevatoriaus dalis uždengiama metaliniu gaubtu *5*. Smulkioms biriosioms medžiagoms transportuoti dažniausiai naudojama begalinė gumuota juosta; judėjimo greitis gali būti iki 2,5 m/s. Jeigu medžiaga transportuojama į didelį aukštį ir ją sudaro stambūs gabalai arba ji yra aukštos temperatūros, tai naudojamos grandinės; judėjimo greitis tada būna ne didesnis kaip 1,25 m/s. Pagal pakrovimo ir iškrovimo pobūdį juostiniai ir grandininiai elevatoriai skirstomi į *greitaeigius ir lėtaeigius*.

Greitaeigių elevatorių (11.101 pav., *a*) kaušai įtvirtinami tam tikru pastoviu atstumu vienas nuo kito. Medžiaga beriama į elevatorių pro angą *6*. Ji byra žemyn ir yra semiama kaušų. Kylančius aukštyn kaušus dar pripildo ir žemyn byranti medžiaga. Greitaeigių elevatorių iškrovimo vietoje medžiaga iš kaušų išbyra veikiama išcentrinės jėgos; kaušų judėjimo greitis $w = 1,2...2,5$ m/s. Greitaeigiai elevatoriai naudojami miltelių pavidalo, smulkiagrūdėms ir vidutinio gabaliukų dydžio medžiagoms transportuoti.

Lėtaeigių elevatorių ($w = 0,4...1,0$ m/s) kaušai dažniausiai tvirtinami greta vienas kito (11.101 pav., *b*). Čia medžiaga byra tiesiai į kaušus. Iš išpilamo

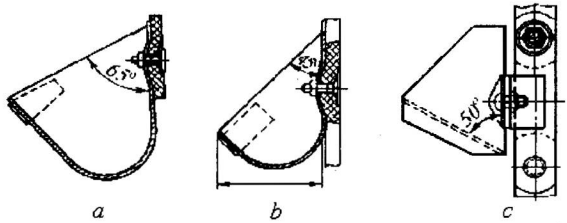
kaušo ji byra žemiau esančio kaušo išoriniu paviršiumi (kaip lataku). Lėtaeigiai elevatoriai naudojami vidutinio dydžio abrazyvių medžiagų gabaliukams ir stambiems medžiagų gabalams transportuoti.



11.101 pav. Kaušiniai elevatoriai:
a – greitaeigis; *b*, *c* – lėtaeigiai; *1* – begalinė juosta (grandinė), *2* – varantysis būgnas (žvaigždutė), *3* – kaušai, *4* – įtempimo būgnas (žvaigždutė), *5* – metalinis apsauginis gaubtas, *6* – krovimo anga, *7* – papildomoji žvaigždutė

Tačiau kartais ir lėtaeigių elevatorių kaušai tvirtinami tam tikru atstumu vienas nuo kito (11.101 pav., *c*). Tuomet medžiaga taip pat semiama kaušais iš apatinės elevatoriaus dalies. Iš lėtaeigių elevatorių ji išbyra veikiama savo masės, todėl, tvirtinant kaušus prie grandinių tam tikru atstumu, statoma papildoma žvaigždutė *7*, kad išbyranti medžiaga patektų į lataką.

Kaušinių elevatorių kaušai esti trijų pagrindinių tipų: *gilieji, seklieji* ir *smailiakampiai* (11.102 pav.).



11.102 pav. Elevatorių kaušai: *a* – gilieji, *b* – seklieji, *c* – smailiakampiai

Gilieji kaušai būna 0,8...15 dm^3 talpos ir naudojami sausoms, labai birioms, lengvai pasemiamoms ir išpilamoms medžiagoms transportuoti. *Seklieji kaušai* būna 0,7...15 dm^3 talpos ir naudojami drėgnoms bei susigulėjusioms

medžiagoms transportuoti. Smailiakampiai kaušai būna 1,5...130 dm^3 talpos ir naudojami stambesnėms bei abrazyvioms medžiagoms transportuoti.

Kaušinio elevatoriaus našumas G_h, t/h, apskaičiuojamas pagal lygtį

$$G_h = 3{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{a}{s} \cdot w \cdot \psi \cdot \rho\,; \qquad (11.138)$$

čia a – kaušo tūris, dm^3; s – žingsnis tarp kaušų, m (elevatorių su suglaustais kaušais žingsnis lygus kaušų aukščiui); w – kaušų judėjimo greitis, m/s; ψ – kaušų pripildymo koeficientas ($\psi = 0{,}5...0{,}9$; jis priklauso nuo transportuojamos medžiagos stambumo, mažesnės vertės imamos stambių gabalų medžiagoms); ρ – transportuojamos medžiagos piltinis tankis, kg/m^3.

Reikalingo elektros variklio galia apskaičiuojama, įskaitant ne tik energijos sąnaudas medžiagai pakelti į aukštį H, reikalingą našumą, bet ir papildomas energijos sąnaudas dėl trinties padidėjimo traukos įtaise, susijusias su medžiagos ir kaušų svirtiniu poveikiu į transporterio juostą, bei dėl judančių kaušų stabdymo jų pripildymo metu. Reikalinga galia traukos įtaise N_k, kW, apskaičiuojama pagal lygtį

$$N_k = 0{,}0267 \cdot G_h \cdot H[1 + \omega_c \cdot ctg\beta + \\ + q_T(7{,}4 \cdot \omega_c \cdot ctg\beta + A)w / G_h + k \cdot w^2 / H]; \qquad (11.139)$$

čia G_h – elevatoriaus našumas, t/h; H – transportavimo aukštis, m; ω_c – bendras pasipriešinimo judėjimui koeficientas (juostinių elevatorių $\omega_c \approx 0{,}07$, grandininių $\omega_c \approx 0{,}11$); β – elevatoriaus pasvirimo į horizontą kampas (vertikaliųjų elevatorių $\beta = 90°$); A – koeficientas, įvertinantis elevatoriaus juostos ir kaušų tipą (juostinių elevatorių $A = 1{,}5$, grandininių su suapvalintų formų kaušais $A = 1{,}1$, o su smailiakampiais kaušais $A = 0{,}85$); k – koeficientas, apibūdinantis energijos sąnaudas kaušams pripildyti medžiagos (birioms miltelių pavidalo ir grūdėtoms medžiagoms $k = 0{,}25$, smulkioms ir vidutinio dydžio gabalų medžiagoms $k = 0{,}65$); w – elevatoriaus kaušų judėjimo greitis, m/s; q_T – elevatoriaus judamųjų dalių vieno išilginio metro masė, kg/m (apytiksliams skaičiavimams $q_T = k_T G_h$; čia $k_T \approx 0{,}45$ juostiniams elevatoriams, $k_T = 0{,}6$ siauriems vienos grandinės elevatoriams ir $k_T = 0{,}9$ – dviejų grandinių elevatoriams).

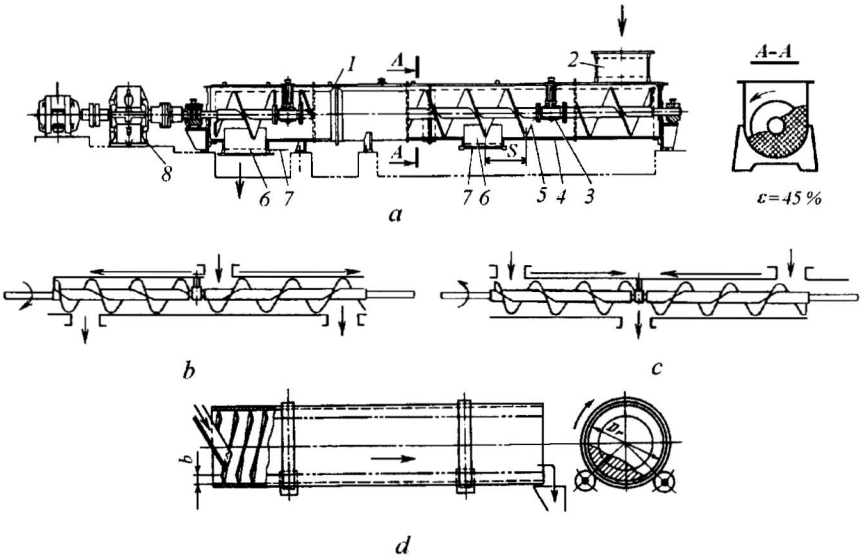
Nustatant reikalingo elektros variklio galią N_v, kW, pagal (11.139) lygtį apskaičiuotą traukos įtaiso galią reikia padidinti, įvertinant būtiną galios atsargą:

$$N_v = 1{,}25 \cdot N_k / \eta\,. \qquad (11.140)$$

11.10.6. Sraigtiniai transporteriai

Sraigtiniai transporteriai naudojami nedideliais atstumais (30...40 m) transportuoti ne tik birioms smulkioms medžiagoms (miltams, cementui, smė-

liui, žvyrui ir pan.), bet ir klampioms bei tešlos pavidalo medžiagoms. Sraigtiniai transporteriai (11.103 pav.) gali būti horizontalieji, nuožulnieji, vertikalieji, paskirstantieji medžiagą ir surenkantieji medžiagas. Prie sraigtinių transporterių taip pat priskiriami ir transportavimo vamzdžiai su sraigtinėmis mentėmis.



11.103 pav. Sraigtiniai transporteriai:
a – horizontalusis sraigtinis transporteris, *b* – paskirstantysis sraigtinis transporteris, *c* – surenkantysis sraigtinis transporteris, *d* – sukamasis transportavimo vamzdis su sraigtinėmis mentėmis

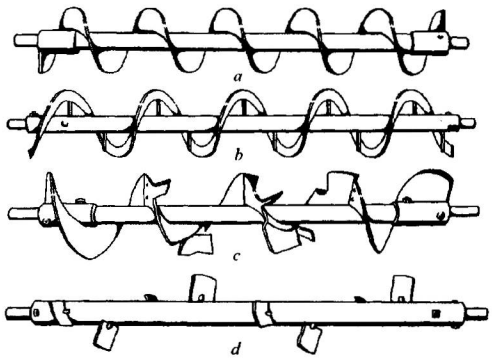
Sraigtinis transporteris sudarytas iš lovio *4* su pusapvaliu dugnu, kurio viduje yra elektros variklio pavaros *8* sukamas sraigtas *5*. Sraigto ašis sukasi riedėjimo guoliuose *3*. Medžiaga pakraunama pro pakrovimo angą *2* ir gali būti iškraunama bet kurioje transporterio vietoje pro lovio apačioje esančias iškrovimo angas *6*, kurias prireikus galima uždaryti sklendėmis *7*. Lovys uždengiamas dangčiu *1*.

Pagrindinis sraigtinio transporterio elementas – sraigtas gali būti įvairios paskirties ir konstrukcijos. Jo geometrinės charakteristikos – skersmuo ir sraigto žingsnis *s* standartizuoti: $D_s = 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800$ mm; $s = 0{,}8 \cdot D_s$ arba $s = D_s$.

Pagal sraigto konstrukciją skiriami sraigtiniai transporteriai su *ištisiniu, juostiniu, fasoniniu ir mentiniu sraigtu* (11.104 pav.).

Smulkios, labai birios medžiagos (cementas, kreida, gipsas, sausas smėlis, granuliuotasis šlakas ir pan.) transportuojamos ištisiniu sraigtu, esant lovio

pripildymo koeficientui $\varepsilon = 0,3...0,45$ ir sraigto sukimosi dažniui $n_s = 50...120$ aps./min. Gabalinės medžiagos (stambus žvyras, trupinta klintis, negranuliuotieji šlakai ir pan.) transportuojamos juostiniu arba mentiniu sraigtu, kai $\varepsilon = 0,25...0,4$ ir $n_s = 40...100$ aps./min. Tešlos pavidalo, susigulėjusios ir šlapios medžiagos (plastiškas molis, betono skiedinys, cemento skiediniai) transportuojami mentiniu arba fasoniniu sraigtu, esant $\varepsilon = 0,15...0,43$ ir $n_s = 60...80$ aps./min.



11.104 pav. Sraigtinių transporterių sraigtų tipai:
a – ištisinis, *b* – juostinis, *c* – fasoninis, *d* – mentinis

Sraigtinių transporterių našumas dažniausiai būna 20...40 m^3/h, o esant didelio skersmens sraigtams gali padidėti iki 100 m^3/h.

Sukamieji transportavimo vamzdžiai su sraigtinėmis mentėmis dažniausiai naudojami transportuojamoms medžiagoms džiovinti arba atvėsinti. Jų sukimo dažnis turi būti nedidelis, kad medžiaga nesisuktų kartu su vamzdžiu. Menčių plotis $b = (0,2...0,3) \cdot D_v$ (čia D_v – vamzdžio vidinis skersmuo), vamzdžio pripildymo koeficientas $\varepsilon = 0,2...0,3$.

Medžiaga sraigtiniame transporteryje juda greičiu w, m/s:

$$w = s \cdot n; \qquad (11.141)$$

čia s – sraigto žingsnis, m; n – sraigto veleno sukimosi dažnis, s^{-1}.

Sraigtiniu transporteriu judančio medžiagos srauto skerspjūvio plotas

$$F = \varepsilon \cdot \pi \cdot D_s^2 / 4. \qquad (11.142)$$

Tuomet sraigtinio transporterio valandinis našumas V_h, m^3/h:

$$V_h = 3600 \cdot w \cdot F = 3600 \cdot s \cdot n \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot D_s^2 / 4 = \\ = 2826 \cdot s \cdot n \cdot \varepsilon \cdot D_s^2; \qquad (11.143)$$

čia $s = 0{,}8 \cdot D_s$ arba $s = D_s$; $\varepsilon = 0{,}15...0{,}45$ (ε vertės didesnės, kai transportuojamos dalelės smulkesnės, didesnis jų tankis ir abrazyvumas),

o našumas pagal transportuojamos medžiagos masę G_h, t/h:

$$G_h = 3600 \cdot w \cdot F \cdot \rho_p = 2{,}826 \cdot s \cdot n \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot \rho_p . \qquad (11.144)$$

Jei medžiaga sraigtiniu transporteriu transportuojama nuožulnia kryptimi, tai priklausomai nuo pasvirimo kampo β dydžio transporterio našumas sumažėja:

$$V_{h\beta} = k_\beta \cdot V_h \text{ arba } G_{h\beta} = k_\beta \cdot G_h ; \qquad (11.145)$$

čia $k_\beta = 0{,}9$, kai $\beta = 5^o$; $k_\beta = 0{,}8$, kai $\beta = 10^o$; $k_\beta = 0{,}7$, kai $\beta = 15^o$, ir $k_\beta = 0{,}65$, kai $\beta = 20^o$.

Pagal (11.143), (11.144) arba (11.145) lygtis apskaičiuotas sraigto skersmens D_s dydis, transportuojant gabalines medžiagas, dar turi būti patikslintas, įvertinant maksimalų gabaliukų dydį a_{max}:

a) nerūšiuotoms medžiagoms – $D_s \geq (4...6) \cdot a_{max}$;
b) rūšiuotoms medžiagoms – $D_s \geq (8...10) \cdot a_{max}$.

Reikalingas sraigto veleno sukimosi dažnis n, s^{-1}, gali būti apskaičiuotas pagal lygtį

$$n = (K \cdot \sqrt{D_s}) / 60 ; \qquad (11.146)$$

čia $K = 60$, *45* ir *30* – atitinkamai smulkioms neabrazyvioms, didelio tankio nebrazyvioms ir abrazyvioms medžiagoms; sukamiems transportavimo vamzdžiams $K = 20...30$.

Sraigtinio transporterio velenui sukti reikalinga galia N_{sr}, kW:

$$N_{sr} = 9{,}62 \cdot 10^{-2} \cdot Q_M \cdot H + 9{,}62 \cdot 10^{-2} \cdot Q_m \cdot L_h \cdot \omega_s + \\ + 9{,}62 \cdot 10^{-2} K_1 \cdot q_T \cdot L_h \cdot w \cdot \omega_c ; \qquad (11.147)$$

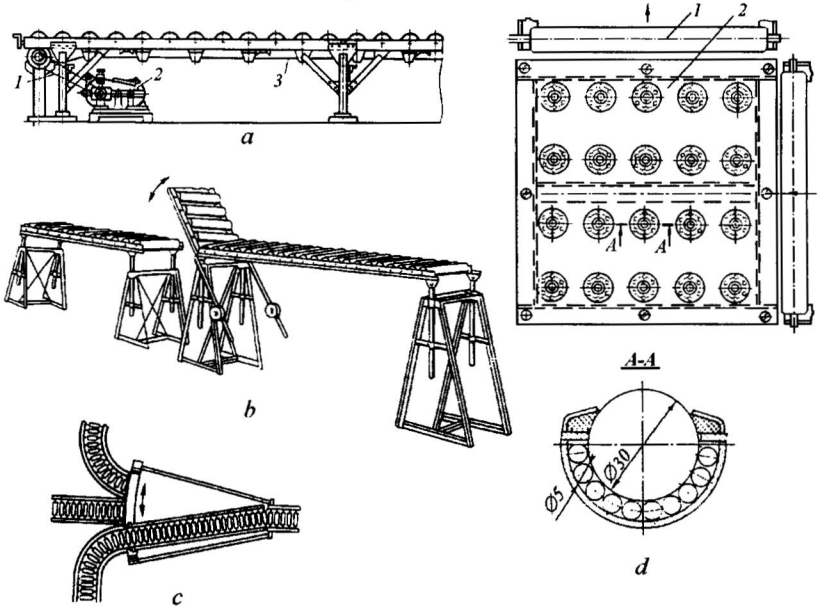
čia Q_M – sraigtinio transporterio našumas, kg/s; H – medžiagos pakėlimo aukštis, m; L_h – transportavimo horizontalia kryptimi projekcijos ilgis, m; ω_s – medžiagos pasipriešinimo judėjimui loviu koeficientas (sausų neabrazyvių medžiagų – $\omega_s = 1{,}2$; drėgnų – $\omega_s = 1{,}5$; mažai abrazyvių – $\omega_s = 2{,}5$; abrazyvių – $\omega_s = 3{,}2$ ir labai abrazyvių – $\omega_s = 4{,}0$); K_1 – koeficientas, įvertinantis sraigto judėjimo pobūdį ($K_1 = 0{,}15$); q_T – sraigto judančių dalių masė; $q_T \approx 80 \cdot D_s$, kg/m (čia D_s – sraigto skersmuo, m); w – ašinis medžiagos judėjimo greitis, m/s; ω_c – sraigto veleno pasipriešinimo judėjimui guoliuose koeficientas (slydimo guoliuose $\omega_c = 0{,}16$; riedėjimo guoliuose $\omega_c = 0{,}08$).

Reikalingo elektros variklio galia apskaičiuojama pagal bendrą išraišką:

$$N_v = N_{sr} / \eta .$$

11.10.7. Ritinėliniai transporteriai

Ritinėliniai transporteriai naudojami vienetiniams, dažniausiai pailgų formų gaminiams transportuoti horizontalia arba nedidelio polinkio kryptimi. Jie sudaryti iš sukamųjų arba nesukamųjų ritinėlių, kurių velenų ašys sukasi rutuliniuose guoliuose (11.105 pav.). Ritinėliai dažniausiai gaminami iš 42...160 mm skersmens vamzdžių.



11.105 pav. Ritinėlinių transporterių (*a*, *b* ir *c*) ir rutulinio stalo (*d*) schemos: a – ritinėlinis transporteris su sukamaisiais ritinėliais (*1* – diržinė pavara, *2* – elektros variklis, *3* – lengvas juostinis transporteris su viršutine ritinėlius sukančia juosta), *b* – ritinėlinis transporteris, c – paskirstantysis ritinėlinis transporteris, *d* – rutulinis stalas (*1* – ritinėliniai transporteriai, *2* – rutulinis stalas)

Ritinėliai išdėstomi (50...400 mm) atstumu, kad transportuojamas gaminys bet kuriame taške remtųsi į tris ritinėlius. Ritinėlių juostos įtvirtinamos rėmuose horizontalia arba nedidelio polinkio (2...3°) kampu; jei gaminius reikia paskirstyti keliomis kryptimis, įrengiamos skirstomosios sekcijos (11.105 pav., *c*). Ritinėliai sukami grandininėmis arba diržinėmis pavaromis.

Įrengus ritinėlių juostas didesniu kampu, gaminiai gali judėti žemyn savaime. Ilguose ritinėliniuose transporteriuose įrengiamos pakeliamosios sekcijos, kad būtų galima prieiti remonto ir aptarnavimo metu (11.105 pav., *b*).

Stambiems gaminiams technologiškai apdoroti kartais naudojami horizontalūs *rutulėlių stalai*, kurių rutulėliai remiasi į riedėjimo guolius (11.105 pav., *d*). Ant tokio stalo plokštumos esantį gaminį nesunku pasukti arba pastumti bet kuria kryptimi.

Naudojant ilgus įvairaus tipo transporterius, kontroliuojamas juostos judėjimo greitis, ant juostos esančios medžiagos kiekis, juostos praslydimas, jos šoninis nukrypimas, skersiniai ir išilginiai juostos plyšiai. Juostos judėjimo greičiui ir jos praslydimui nustatyti naudojami tachogeneratoriai, kurių vienas specialiais ritinėliais prijungiamas prie varančiojo būgno, o kitas – prie juostos tuščiosios eigos dalies. Juostos skersinio nutrūkimo signalizavimo jutikliai – plonos vielelės, ištemptos po juostos tuščiosios eigos dalies apatiniu paviršiumi. Juostos išilginį įplyšimą signalizuoja nedidelės spyruoklių tipo plokštelės, prijungtos prie juostos darbinės dalies apatinio paviršiaus – kai juosta įplyšta per vidurį, plokštelė apkraunama pro plyšį išbyrėjusia medžiaga ir atjungiami signalinės relės kontaktai. Medžiagos kiekiui ant transporterio juostos kontroliuoti naudojamos atsilenkiančios mentelės arba pasikeliantys ritinėliai, įrengiami virš transporterio juostos darbinės dalies. Pagal šių prietaisų signalus transporterio darbo parametrai valdomi automatinėmis valdymo sistemomis.

11.11. Pneumatinis transportas

Galimi trys pneumatinio medžiagų transportavimo būdai:

1) *pakibusios būsenos dalelių* transportavimas didelės koncentracijos judančio oro srautu, kai viename kilograme oro yra 1...50 kg medžiagos, arba mažos koncentracijos pneumatiniu transportu;

2) *mechaniniu būdu*, judant aeruotai, takiai medžiagai pneumatiniais loviais arba keliant ją pneumatiniais kėlikliais, kai 1 kg oro yra 120...250 kg medžiagos. Šis transportavimo būdas dar vadinamas didelės koncentracijos mišinių pneumatiniu transportu;

3) kai medžiaga yra atskirose *talpyklose, kurios juda didelio skersmens vamzdžiuose dėl oro slėgių skirtumų.*

Pagrindinis pneumatinio transportavimo būdas yra pirmasis, kai smulkiai sumaltos arba birios (1...80 mm dydžio) medžiagos kartu su oro srautu yra transportuojamos mažo skersmens (dažniausiai 50...240 mm) vamzdžiais dideliais atstumais (iki 2,5 km), kartais – į didelį aukštį (iki 40 m).

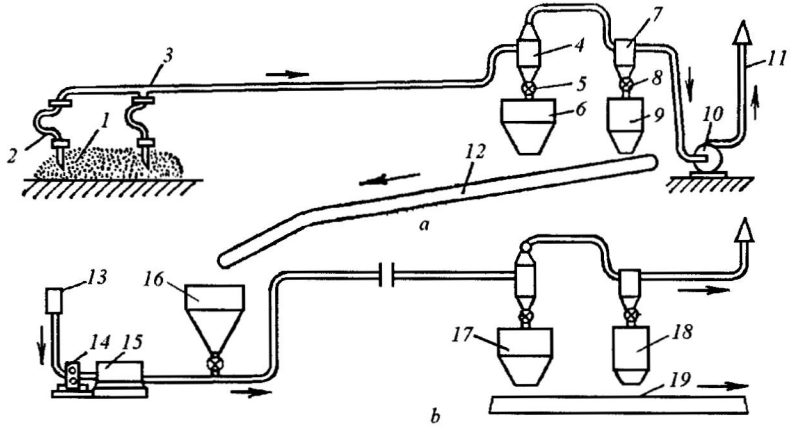
Antrasis būdas taikomas taip pat smulkioms, birioms medžiagoms transportuoti, kai transportavimo atstumai ir aukščiai yra nedideli (iki 25 m).

Trečiasis būdas taikomas gabalinėms medžiagoms, sudėtoms į specialius patronus, konteinerius arba vagonėlius su ratukais, transportuoti didelio skersmens (0,8...1,6 m) vamzdžiais.

Mažos koncentracijos pneumatinio transporto teigiamybės yra įrenginio hermetiškumas, įgalinantis išvengti transportuojamos medžiagos nuostolių, dulkėjimo, užteršimo; kompaktiškumas; galimybė transportuoti medžiagas dideliais atstumais (iki 2 km), sudėtingos konfigūracijos trasomis ir į didelį aukštį (iki 100 m); didelis našumas (200...300 t/h ir daugiau), dideli transportavimo greičiai (iki 35 m/s).

Didžiausi šio pneumatinio transporto trūkumai yra: didelės savitosios oro ir energijos sąnaudos (3...6 kartus didesnės negu mechaninių transporterių), greitas įrenginių detalių ir transportavimo vamzdynų išsidėvėjimas, transportuojant abrazyvias daleles, būtinybė atskirti ir išvalyti transportavimui naudotą orą.

Pneumatinis transportas gali būti *įsiurbiamasis, slegiamasis ir mišrusis.*



11.106 pav. Pneumatinio transportavimo oro srautu schemos:
a – įsiurbiamojo, *b* – slegiamojo

Įsiurbiamasis pneumatinis transportas (11.106 pav., *a*) naudojamas, kai birias medžiagas reikia paimti iš atvirų talpyklų arba krūvų skirtingų vietų ir kai reikalingi transportavimo atstumai bei aukščių skirtumai yra nedideli, kadangi vakuuminiais oro siurbliais arba išcentriniais ventiliatoriais galima sudaryti tik 40...80 kPa vakuumą.

Medžiaga pro vieną arba keletą įsiurbimo tūtų *1* įsiurbiama į lankstų gofruotą vamzdį *2*, iš kurio ji patenka į transportavimo vamzdyną *3*. Iškrovimo vietoje *4* medžiaga iš oro srauto atskiriama ciklonuose arba nusodinimo kame-

rose dėl išcentrinės jėgos poveikio ir staigaus srauto greičio sumažėjimo (nusodinimo įrenginių skerspjūvio plotas yra 50...150 kartų didesnis už vamzdžių skerspjūvio plotą). Iš oro srauto atskirtos dalelės pro sklendę *5* patenka į surinkimo bunkerį *6*.

Iš ciklono arba nusodinimo kameros ištekantis oras yra dar užterštas smulkiausiomis dalelėmis, todėl jis valomas ciklonų baterijoje, rankoviniais arba elektriniais filtrais. Šiuose aparatuose atskirtos medžiagos dalelės per šliužinę užtvarą *8* patenka į bunkerį *9*. Kartais oras valomas šlapiuoju būdu skruberiais ir panašiais aparatais). Išvalytas oras patenka į vakuuminį siurblį arba išcentrinį ventiliatorių *10*, o iš jo – į išmetimo vamzdį *11*.

Slegiamąjį pneumatinį transportą (11.106 pav., *b*) galima naudoti, kai medžiaga tiekiama į transportavimo vamzdyną iš bunkerių ar kitų uždarų talpyklų. Šiuo pneumatiniu transportu medžiagą iš vieno rezervuaro galima tiekti į keletą atšakų.

Transportavimui reikalingas 200...800 kPa oro slėgis vamzdyne sudaromas ir palaikomas orapūtėmis arba kompresoriais *14*, į kuriuos iš atmosferos jis patenka pro oro filtrą *13*. Suslėgtas oras prieš tiekiant į transportavimo vamzdyną oro valymo ir aušinimo aparate *15* yra išvalomas (pašalinami vandens ir alyvos lašeliai) ir atvėsinamas iki 30...50 °C. Kompresoriumi tiekiamo oro slėgio ir debito pulsacijoms sumažinti įrengiamas suslėgto oro rezervuaras (resiveris). 200...800 kPa slėgio oras medžiagą gali transportuoti dideliais atstumais arba į didelį aukštį. Iškrovimo vietoje medžiaga atskiriama ir oras valomas taip pat, kaip ir įsiurbiamojo transportavimo atveju. Bunkeriuose *17* ir *18* surinkta medžiaga gali būti toliau transportuojama į perdirbimo įrenginius transporteriu *19*.

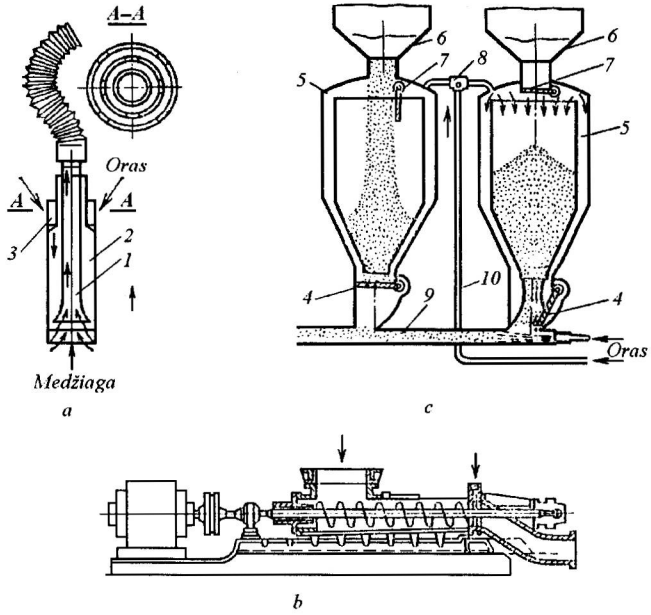
Į transportavimo vamzdyną medžiaga gali būti tiekiama iš bunkerio *16* pro hermetišką sukamąją sektorinę sklendę arba sraigtiniais ir kameriniais tiektuvais (11.107 pav., *b* ir *c*).

Sraigtinį tiektuvą (11.107 pav., *b*) sudaro mažėjančio skersmens arba mažėjančio žingsnio sukamasis sraigtas, į kurio cilindrą tiekiama medžiaga, kuri, sukantis sraigtui, sutankėja ir išmetimo angoje sudaro kamštį, neleidžiantį suslėgtam orui iš transportavimo vamzdyno patekti į tiektuvą. Sutankinta medžiaga, patekusi į transportavimo vamzdyną, suslėgto oro srauto yra supurenama ir pereina į pakibusią būseną.

Sraigtinių tiektuvų našumas būna 20...200 t/h, transportavimo suslėgtu oru nuotolis gali siekti 200 m. Jų našumas G_h (pagal cementą), t/h, apytiksliai gali būti nustatomas iš empirinės lygties:

$$G_h = (0{,}125....0.2)\cdot 10^{-2}\cdot D_s^2; \qquad (11.148)$$

čia D_s – sraigto skersmuo, m; didesnės koeficiento vertės imamos didesnio skersmens sraigtams.



11.107 pav. Pneumatinio transporto įsiurbimo tūtos ir tiektuvų schemos: *a* – įsiurbimo tūta: *1* – medžiagos ir oro mišinio tiekimo vamzdis, *2* – apvalkalas orui tiekti į tūtą, *3* – perforuotas pasukamasis tarpiklis reikiamos koncentracijos oro ir medžiagos mišiniui tūtoje sudaryti; *b* – sraigtinis medžiagos tiektuvas; *c* – dviejų kamerų medžiagos tiektuvas: *4* ir *7* – sklendės, *5* – kameros, *6* – medžiagos tiekimo bunkeriai, *8* – kamerų perjungimo vožtuvas, *9* – transportavimo vamzdynas, *10* – suslėgto oro tiekimo vamzdis

Sraigtiniai tiektuvai nepakankamai ekonomiški, greitai išsidėvi (po 500...1200 eksploatavimo valandų). Todėl dažniausiai medžiagai tiekti naudojami *kameriniai tiektuvai* (11.107 pav., *c*), kurių kameros *5* pakaitomis automatiškai pripildomos transportuojamos medžiagos. Slėgis transportavimo vamzdyne ir kameroje jos iškrovimo metu sudaromas vamzdynais *10* tiekiamu suslėgtu oru. Kadangi kameros yra dvi, medžiaga į transportavimo vamzdyną tiekiama nepertraukiamai.

Kamerinių tiektuvų našumas G_h, t/h:

$$G_h = (5...12) \cdot V ; \qquad (11.149)$$

čia V – vienos kameros tūris, m^3.

Jei medžiagą reikia iškrauti iš vagono arba kito atviro rezervuaro ir transportuoti tolimais atstumais, naudojama *mišri pneumatinio transportavimo*

schema, gauta sujungiant įsiurbiamąją ir slėginę pneumatinio transportavimo linijas.

Skaičiuojant pneumatinio transporto aparatus reikia nustatyti reikalingas oro sąnaudas, jo greitį, transportavimo vamzdžio skersmenį, slėgio nuostolius vamzdyne ir visuose pneumatinio transporto linijos aparatuose bei suminį reikalingą slėgį ir elektros variklio galią.

Reikalingos oro sąnaudos Q_o apskaičiuojamos, žinant valandinį medžiagos transportavimo našumą G_h:

$$Q_o = G_h / (3{,}6 \cdot \rho_o \cdot \mu); \qquad (11.150)$$

čia Q_o – oro sąnaudos, m^3/s; G_h – valandinis medžiagos transportavimo našumas, t/h; ρ_o – atmosferos oro tankis, kg/m^3 (skaičiavimuose $\rho_o = 1{,}244$ kg/m^3); μ – transportuojamo mišinio koncentracija, t. y. per vieną sekundę pernešamos medžiagos masės santykis su per tą pačią trukmę sunaudojama oro mase (smėlio, skaldos – $\mu = 3...20$; cemento – $\mu = 20...100$).

Nustatant oro greitį, reikia atsižvelgti į tai, kad *slėgis*, o kartu ir *greitis*, *vamzdyno ilgyje kinta.*

Transportavimo vamzdyne dėl vietinių kliūčių ir trinties slėgis mažėja transportavimo kryptimi. Kadangi oro debitas pastovus, tai, mažėjant oro slėgiui, didėja jo greitis. Todėl įsiurbiamojo pneumatinio transporto linijose minimalus oro greitis w_{min} yra prie įsiurbimo tūtos, o maksimalus w_{max} – prie siurblio. Slėginio pneumatinio transportavimo linijose w_{min} yra prie kompresoriaus, o w_{max} – iškrovimo vietoje.

Minimalus oro greitis turi būti pakankamas tam, kad išlaikytų medžiagos daleles pakibusias. Jis priklauso nuo transportuojamų dalelių tankio, jų dydžio, geometrinės formos ir dalelių sklendimo oro greičio w_s, kuris nustatomas iš judančios dalelės sunkio jėgos ir oro srauto dinaminės jėgos pusiausvyros sąlygos:

$$m \cdot g = k \cdot \rho_o \cdot F_d \cdot w_s^2; \qquad (11.151)$$

čia m – dalelės masė, kg; g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2; k – koeficientas, įvertinantis dalelės dydį ir jos geometrinę formą; F_d – dalelės skerspjūvio plotas, m^2; ρ_o – oro tankis, kg/m^3.

Kadangi netaisyklingos formos dalelių k dydį nustatyti sunku, tai įprasta realią medžiagos dalelę pakeisti tokios pat masės ir tūrio ekvivalentiniu rutuliuku, kurio $k \approx 0{,}23$. Ekvivalentinio rutuliuko masė:

$$m = \pi \cdot d^3 \cdot \rho_M / 6; \qquad (11.152)$$

čia m – rutuliuko masė, kg; d – rutuliuko skersmuo, m; ρ_M – rutuliuko medžiagos tankis, kg/m^3.

Į (11.151) lygybę įrašius rutuliuko k ir m išraiškas, gaunama, kad lygaus paviršiaus rutuliuko

$$w_s = 5{,}33 \cdot \sqrt{d \cdot \rho_M / \rho_o}\ ; \qquad (11.153)$$

čia w_s – rutuliuko sklendimo greitis, m/s; ρ_o – skaičiuojamasis transportuojančiojo oro tankis $\rho_o = 1{,}244 \cdot \varepsilon$, kg/m^3 (įsiurbiamojo pneumatinio transporto atveju $\varepsilon \approx 0{,}75$, o slegiamojo – $\varepsilon \approx 1{,}5$); d – ekvivalentinio rutuliuko skersmuo; ρ_M – rutuliuko medžiagos tankis, kg/m^3.

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad netaisyklingos formos ir šiurkštaus paviršiaus dalelių sklendimo greitis w_x yra daug mažesnis nei lygaus rutuliuko:

$$w_x = k_f \cdot w_s\ ; \qquad (11.154)$$

čia w_s – rutuliuko sklendimo greitis, m/s; ekvivalentinio rutuliuko $k_f = 1{,}0$; apvalių formų, bet nelygaus paviršiaus dalelių $k_f = 0{,}64$, pailgų dalelių $k_f = 0{,}57$ ir plokštelių pavidalo dalelių $k_f = 0{,}45$.

Taigi, jei medžiagos dalelės yra netaisyklingos formos, jos bus patikimai pernešamos oro srauto, jei oro greitis bus lygus ekvivalentinio rutuliuko sklendimo greičiui arba truputį didesnis. Tačiau nustatant transportuojamų *labai smulkių dalelių sklendimo greitį reikia atsižvelgti į dalelių agregacijos procesų įtaką.* Taip, pvz., nustatyta, kad jei cemento dalelių, kurių dydis 60...80 mikronų, sklendimo greitis $w_s = 0{,}2$ m/s, tai cemento dalelių agregatų, kurių dydis apie 0,4 mm, sklendimo greitis $w_s = 5{,}3$ m/s.

Įvertinus anksčiau minėtų veiksnių įtaką, projektuojant pneumatinio transporto vamzdynus, minimalus oro greitis imamas 25...50 % didesnis už dalelių sklendimo greitį. Kai kurioms medžiagoms transportuoti rekomenduotini skaičiuojamieji oro greičiai pateikti 11.8 lentelėje.

11.8 lentelė. Minimalūs skaičiuojamieji transportavimo greičiai

Eil. Nr.	Transportuojama medžiaga	Greitis w_{min}, m/s	Eil. Nr.	Transportuojama medžiaga	Greitis w_{min}, m/s
1.	Cementas	5,3	6.	Medvilnė, plona vilna	12...14
2.	Drėgnos pjuvenos	7,5	7.	Stora vilna	18...20
3.	Trupintos anglys	11	8.	Smėlis	30
4.	Odos atraižos	10...12	9.	Trupinta skalda	70
5.	Medžio drožlės	15			

Galutiniai didžiausi greičiai w_{max} priklauso nuo transportavimo nuotolio ℓ. Smulkių medžiagų, pvz., portlandcemenčio, w_{max} gali būti tokie:

ℓ, m	100	200	300	400	500	600	700
w_{max}	7	22	26	28	30	32	34

Vidutinis transportavimo vamzdynu greitis:

$$\overline{w} = 0{,}5 \cdot (w_{max} + w_{min}). \qquad (11.155)$$

Transportavimo stabilumui užtikrinti darbinis transportavimo greitis dar turi būti padidintas, atsižvelgiant į transportuojamo mišinio masės koncentraciją μ_o, $kg_{medžiagos}/kg_{oro}$:

$$w_d = k_\mu \cdot \overline{w}; \qquad (11.156)$$

čia w_d – darbinis transportavimo greitis; koeficiento k_μ vertės priklauso nuo masės koncentracijos μ_o:

μ_o	1	2	10	16
k_μ	1,25	1,50	2,0	3,0

Nustačius reikiamą darbinį transportavimo greitį w_d, galima apskaičiuoti reikalingą vamzdyno skerspjūvio plotą F_v ir vamzdžio skersmenį:

$$F_v = Q_s / w_d; \qquad (11.157)$$

čia Q_s – transportavimui reikalingo oro debitas, m^3/s.

Apskaičiavus transportavimui reikalingą oro srauto greitį w_d, galima nustatyti bendrą slėgių skirtumą, kuris reikalingas reikiamam srauto greičiui pasiekti ir visiems suminiams pasipriešinimams transportavimo vamzdyne ir jame sumontuotuose įrenginiuose nugalėti:

a) slėgio nuostoliai p_v įsiurbimo tūtoje, Pa:

$$p_v = 0{,}625 \cdot w_d^2 \cdot (10 + 0{,}5 \cdot \mu_o); \qquad (11.158)$$

b) slėgio nuostoliai transportuojant medžiagą skersmens D, m, vamzdžiu horizontaliu atstumu ℓ, m, ir į aukštį h, m:

$$p_m = 0{,}625 \cdot w_d^2 \cdot \left(\frac{\ell + h}{D}\right) \cdot (1 + k \cdot \mu_o) \cdot (0{,}0125 + \frac{0{,}0011}{D}) \qquad (11.159)$$

(čia koeficientas k įvertina darbinį greitį: kai $w_d = 15$ m/s, $k = 0{,}46$; kai $w_d = 20$ m/s, $k = 0{,}33$, o kai $w_d = 25$ m/s, $k = 0{,}24$);

c) slėgio nuostoliai vertikaliosiose vamzdyno dalyse:

$$P_h = 12{,}44 \cdot h \cdot (1 + \mu_o); \qquad (11.160)$$

d) slėgio nuostoliai vamzdyno alkūnėje arba atsišakojime:

$$P_a = 0{,}16 \cdot Q_s \cdot w_d^2; \qquad (11.161)$$

e) slėgio nuostoliai medžiagos atskyrimo įrenginyje $p_n \approx 2000$ Pa;

f) slėgio nuostoliai oro filtre $p_f \approx 1000$ Pa.

Apskaičiuojant suminius slėgio nuostolius, įrašomas slėgio atsargos koeficientas $k_a = 1{,}25$:

$$\sum P = 1{,}25 \cdot (p_v + p_M + \sum p_h + \sum p_a + p_n + p_f). \qquad (11.162)$$

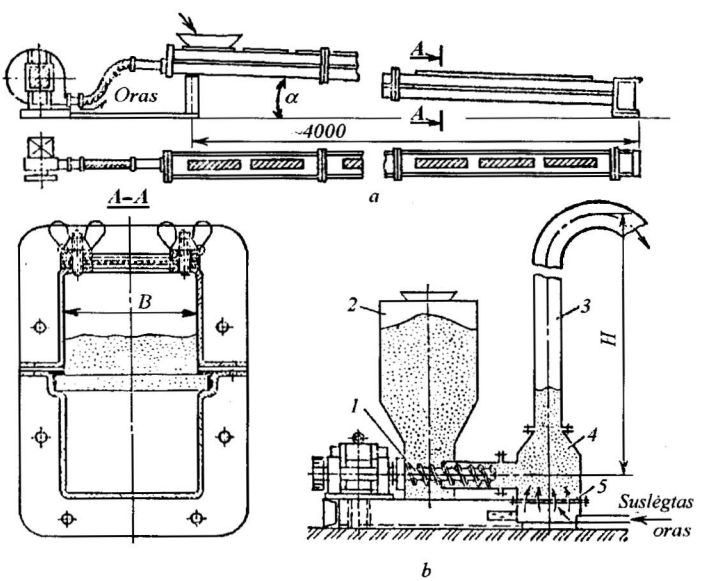
Tuomet reikalinga oro siurblio galia N, kW:

$$N = \sum p \cdot Q_s / 1000. \qquad (11.163)$$

Reikalinga oro kompresoriaus (orapūtės arba ventiliatoriaus) variklio galia

$$N_v = N / \eta.$$

Aeruotos birios medžiagos *mechaniniu būdu* transportuojamos *pneumatiniais latakais ir pneumomechaniniais kėlikliais* (11.108 pav.).



11.108 pav. Aeruotų medžiagų transportavimo įrenginiai: *a* – pneumatinis latakas; *b* – pneumomechaninis kėliklis: *1* – mažėjančio žingsnio sraigtinis tiektuvas, *2* – bunkeris, *3* – vertikalusis vamzdis, *4* – aeravimo kamera, 5 – akytoji pertvara

Pneumatiniai latakai (11.108 pav., *a*) vietoj sraigtinių arba juostinių transporterių naudojami tais atvejais, kai smulkiai sumaltas arba smulkias gabalines medžiagas reikia transportuoti žemyn nedideliu polinkio kampu. *Pneumatinių* latakų konstrukcija paprastesnė, mažesnės transportavimo ir eksploatacijos išlaidos.

Pneumatinį lataką sudaro reikiamo ilgio nuožulnusis hermetiškas kanalas, akytąja pertvara padalytas į dvi dalis – viršutinę ir apatinę. Į viršutinę dalį, ant akytosios pertvaros (iš keraminių plytelių arba tankaus tvirto audinio) 50...100 mm sluoksniu tiekiama medžiaga; į apatinę dalį ventiliatoriumi pučiamas iki 4 kPa viršslėgio oras. Aeruota, prisotinta oro medžiaga teka pneumatiniu lataku žemyn.

Oro sąnaudos pneumatiniuose latakuose – iki 2 m^3/min vienam kvadratiniam metrui pneumatinio latako pertvaros ploto, pneumatinio latako polinkio kampas $\alpha = 2...4^o$. Tiekiamas oras turi būti sausas, todėl, naudojant kompresorius, jis leidžiamas per vandens ir alyvos skirtuvą. Akytoji pertvara turi būti glaudžiai prigludusi prie kanalo sienelių, todėl prieš įdedant į suveržiamąsias kanalo korpuso išėmas ji patepama specialiu tepalu. Oro perteklius iš viršutinės pneumatinio latako dalies pasišalina pro kanalo viršuje esančias angas, uždengtas tankiu audiniu.

Medžiagos judėjimo žemyn greitis w, m/s, apytiksliai gali būti apskaičiuotas pagal lygtį

$$w = 10 \cdot \sqrt{B \cdot tg\alpha}\ ; \qquad (11.164)$$

čia B – pneumatinio latako plotis, m; α – polinkio kampas.

Pneumatiniai latakai gaminami 0,1...0,5 m pločio ir iki 40 m ilgio. Žinant ant akytosios pertvaros esančios medžiagos sluoksnio storį h, galima apskaičiuoti pneumatinio latako našumą V_s, m^3/s:

$$V_s = B \cdot h \cdot w\,. \qquad (11.165)$$

Pneumatiniam latakui reikalingo oro kiekį transportuojančios kompresorinės mažinos elektros variklio galia N_v, kW, apskaičiuojama pagal empirinę lygtį:

$$N_v = 0{,}6 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot V_h \cdot L\,; \qquad (11.166)$$

čia V_h – pneumatiniu lataku transportuojamos medžiagos valandinis našumas, m^3/h, L – pneumatinio latako ilgis, m.

Pneumatinių latakų našumas būna iki 120 m^3/h.

Pneumomechaniniai kėlikliai (11.108 pav., *b*) naudojami miltelių pavidalo medžiagai pakelti į aukštį *H*. Iš bunkerio *2* sraigtiniu tiektuvu *1* mažėjančio žingsnio sraigtu medžiaga tiekiama į aeravimo kamerą *4*, ant jos akytosios pertvaros *5*. Kameroje medžiaga aeruojama pro akytąją pertvarą tiekiamu 50...120 kPa viršslėgio oru, tampa taki ir vamzdžiu *3* ištisiniu srautu kyla į viršų.

Tokie pneumomechaniniai kėlikliai gaminami trijų našumų: 30, 60 ir 100 t/h, kai pakėlimo aukštis iki 35 m.

Oro sąnaudos pneumomechaniniuose kėlikliuose nėra didelės ir priklauso nuo transportuojamos medžiagos kiekio ir jos pakėlimo aukščio. Apytiksliai

$$Q_o = 0{,}2...0{,}3 \cdot G_h \cdot H \; ; \qquad (11.167)$$

čia Q_o – oro sąnaudos, m^3/h; G_h – kėliklio našumas pagal transportuojamos medžiagos masę, t/h; H – medžiagos pakėlimo aukštis, m.

Slėgis aeravimo kameroje turi būti pakankamas medžiagai supurenti ir jos mišiniui pakelti į aukštį H. Aeruotai medžiagai pakelti reikalingas slėgis turi būti didesnis už jos stulpo vertikaliame vamzdyje sudaromą slėgį p_H, Pa:

$$p_H = H \cdot \rho_o \cdot (1 + \mu_o) \cdot g \; ; \qquad (11.168)$$

čia ρ_o – oro tankis, kg/m^3; μ_o – aeruoto mišinio masinė koncentracija, kg/kg_{oro}.

Atsižvelgiant į slėgį, reikalingą transportuojamai medžiagai supurenti, aeravimo kameroje dažniausiai palaikomas 0,12 MPa viršslėgis.

Kėliklio sraigtiniam tiektuvui reikalingą elektros variklio galią N_v, kW, apytiksliai galima apskaičiuoti pagal empirinę lygtį:

$$N_v = (0{,}004...0{,}006) \cdot G_h \cdot H \; ; \qquad (11.169)$$

čia G_h – našumas, t/h; H – pakėlimo aukštis, m.

Talpyklose pneumatiniu būdu transportuojamos ne tik korespondencijos, dokumentai, prekės ir panašūs daiktai, bet ir gabalinės žaliavos (pvz., iš karjero į įmonę tiekiamos medžiagos).

Šiuo atveju į didelio skersmens (0,8...1,6 m) pneumatinio transportavimo vamzdį sudedami konteineriai arba vagonėliai, kurie pagal perimetrą ratukais remiasi į vidinį vamzdžio paviršių. Vagonėlio gale yra apvalūs dangčiai, kurių skersmuo truputį mažesnis už vamzdžio vidinį skersmenį. Vagonėliai vamzdžiu gali būti transportuojami atskirai, po vieną, arba sujungti į bendrą sąstatą. Kraštiniai vagonėlių dangčiai turi guminius tarpiklius. Į vagonėlius gali būti sukraunama iki 2...3 tonų medžiagos. Tiekiant į vamzdį suslėgtą orą, vagonėliai vamzdyje juda iki 30 km/h greičiu. Reikalingas oro slėgis nėra didelis ir priklauso nuo vagonėlio arba vagonėlių sąstato masės, vamzdžio skerspjūvio pripildymo vagonėlių laipsnio, bendro pasipriešinimo judėjimui koeficiento ir vietovės, kurioje išdėstyti pneumatinio transporto vamzdžiai, reljefo. Transportavimas vamzdžiais daugeliu atvejų yra ekonomiškesnis už transportavimą automobiliais.

PRIEDAI

Panašumo kriterijai ir kiti kompleksai

$Ar \equiv \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_k - \rho}{\rho}$	Archimedo kriterijus	$Gr \equiv \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$	Grashofo kriterijus
$a, S_x \equiv \frac{k_x \cdot F}{L}$	Pernešimo vienetų skaičius	$Nu \equiv \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$	Niuselto kriterijus
$Bi \equiv \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_k}, \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_k}$	Bio kriterijus	$Pe_d \equiv \frac{w \cdot l}{D}$	Difuzinis Peklė kriterijus
$b, S_x \equiv \frac{k_y \cdot F}{D}$	Pernešimo vienetų skaičius	$Pe_š \equiv \frac{w \cdot l}{D}$	Šiluminis Peklė kriterijus
$c \equiv \frac{L}{m \cdot D}$ $c' \equiv \frac{m \cdot D}{L}$	Masės pernešimo faktoriai	$Pe_e \equiv \frac{w \cdot l}{E}$	Išilginio maišymo (efektyvusis) Peklė kriterijus
$Eu \equiv \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}$	Eulerio kriterijus	$Fi \equiv \frac{D \cdot \tau}{l^2}, \frac{D \cdot \tau}{R^2}$	Fiko kriterijus
$Pr \equiv \frac{\nu}{a}$	Prandtlio kriterijus	$Eu \equiv \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \frac{a \cdot \tau}{R^2}$	Furjė kriterijus
$Re \equiv \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu}, \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \frac{w \cdot d}{\nu}$	Reinoldso kriterijus	$Fr \equiv \frac{g \cdot l}{w^2}$	Frudo kriterijus
$Sc \equiv \frac{\nu}{D}$	Šmidto kriterijus	$Sh \equiv \frac{\beta \cdot l}{D}, \frac{\beta \cdot d}{D}$	Šervudo kriterijus
$St_d \equiv \frac{\beta}{w}$	Difuzinis Stantono kriterijus	$St \equiv \frac{\alpha}{c \cdot \rho \cdot w}$	Šiluminis Stantono kriterijus
$We \equiv \frac{\sigma}{g \cdot \rho_{sk} \cdot l^2}$	Vėberio kriterijus		

Tarptautinė vienetų sistema *SI*

Tarptautinė fizikinių dydžių matavimo sistema *SI* (*Systeme Internationale*) yra universali matų sistema, tinkanti visoms mokslo, technikos ir ūkio šakoms. Tarptautinė vienetų sistema Lietuvoje pradėjo galioti nuo 1963 m. sausio 1 d.

Pagrindiniai SI sistemos vienetai:

ilgis – metras (*m*);
masė – kilogramas (*kg*);
laikas – sekundė (*s*);
elektros srovės stiprumas – amperas (*A*);
termodinaminė temperatūra – kelvinas (*K*);
medžiagos kiekis – molis (*mol*);
šviesos stiprumas – kandela (*cd*).

Papildomi vienetai:

plokščiasis kampas – radianas (*rad*);
erdvinis kampas – steradianas (*sr*).

Tarptautinės sistemos išvestiniai vienetai yra sudaryti vadovaujantis fizikos dėsniais, nustatančiais ryšį tarp fizikinių dydžių. Šioje sistemoje yra aiškus skirtumas tarp masės (kilogramas – *kg*) ir jėgos (niutonas – *N*) vienetų. Mechaninė, šiluminė, cheminė ir elektros energija matuojamos vienu universaliu vienetu – džauliu (*J*).

Kartotiniai ir daliniai vienetai sudaromi dauginant arba dalijant matavimo vienetą iš 10 atitinkamu laipsniu. Jų pavadinimas gaunamas prie pagrindinių ar išvestinių vienetų pavadinimo pridėjus standarte nustatytą priešdėlį:

10^{18} – eksa (E)	10^{-1} – deci (d)
10^{15} – peta (P)	10^{-2} – centi (c)
10^{12} – tera (T)	10^{-3} – mili (m)
10^{9} – giga (G)	10^{-6} – mikro (μ)
10^{6} – mega (M)	10^{-9} – nano (n)
10^{3} – kilo (k)	10^{-12} – piko (p)
10^{2} – hekto (h)	10^{-15} – femto (f)
10^{1} – deka (da)	10^{-18} – ato (a)

Jeigu pagrindinio ar išvestinio vieneto pavadinimas jau turi priešdėlį (pvz., kilogramas), sudarant kartotinius ir dalinius vienetus, priešdėliai jungiami prie pagrindinio pavadinimo, pavyzdžiui: miligramas, megagramas (ne mikrokilogramas, kilokilogramas).

Jei kartotinis ar dalinis matavimo vienetas turi standarto nustatytą atskirą pavadinimą, tai vartoti pavadinimą su priešdėliu nebūtina. Pavyzdžiui, megagramas gali būti vadinamas tona ir t. t.

Neleistina jungti priešdėlius prie pavadinimų tokių neprieš dėlinių vienetų, kurie yra kokių nors matavimo vienetų daliniai ar kartotiniai vienetai. Pavyzdžiui, negalima vadinti „megatona" arba „mikromikronas", o reikia – „milijonas tonų", „pikometras" ir t. t. Neleistina sudaryti naujus nesisteminius vienetus, pvz., slėgiui matuoti nevartotinas N/cm^2 vietoj kgf/cm^2. Slėgis matuojamas tik *SI* sistemos vienetais N/m (Pa) arba jo kartotiniais bei daliniais vienetais.

Kartotiniai ir daliniai ploto ir tūrio vienetai (taip pat ir kitų dydžių vienetai, kurie sudaromi keliant pradinį vienetą laipsniu) sudaromi pridedant priešdėlį prie pradinio vieneto pavadinimo, pavyzdžiui:

$$1\ km^2 = (1\ km)^2 = (10^3\ m)^2 = 10^6\ m^2;$$
$$1\ cm^3 = (1\ cm)^3 = (10^{-2}\ m)^3 = 10^{-6}\ m^3;$$
$$1\ cm^{-1} = (1\ cm)^{-1} = (10^{-2}\ m)^{-1} = 100\ m^{-1}.$$

Paversti SI vienetą kartotiniu ir daliniu vienetu bei atvirkščiai yra nesunku, nes priešdėlis rodo, kokį daugiklį reikia imti, pavyzdžiui:

$$x\ nanometrų = x\ nm = x \cdot 10^{-9}\ m;$$
$$y\ pikofaradų = y\ pF = y \cdot 10^{-12}\ F;$$
$$z\ megagramų = z\ Mg = z \cdot 10^6\ g = z \cdot 10^3\ kg.$$

Sutrumpinti vienetų žymėjimai rašomi tik po skaitinių verčių. Jei dydžio dimensija reiškiama trupmena ir vietoj dalybos ženklo vartojams įstrižas brūkšnys, vardiklyje esanti vienetų sandauga rašoma skliausteliuose. Pavyzdžiui, rašoma taip: $J/(kg \cdot K)$. Šiuo atveju be skliaustelių būtų neaišku, kas dauginama iš K – ar vardiklyje esantis vienetas (kg), ar visa trupmena (J/kg). Jeigu trupmenai užrašyti vartojamas horizontalus brūkšnys arba toji trupmena išreiškiama neigiamu laipsnio rodikliu, tai skliaustelių nereikia. Pavyzdžiui, rašoma taip:

$$\frac{J}{kg \cdot K} \text{ arba } J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}.$$

Pagrindiniai dimensijos vienetai surašomi tokia tvarka: ilgio (m), masės (kg) ir laiko (s) vienetai.

Atkreiptinas dėmesys į naujoje sistemoje vartojamas sąvokas „masė", „sunkio jėga", „tankis", „savitasis sunkis" ir pan.

Kūno masė – jo inertiškumo matas, t. y. kūno savybė įgyti tam tikrą pagreitį, veikiant atitinkamai jėgai. Medžiagos kiekis paprastai nustatomas svirtinėmis svarstyklėmis, t. y. dedant svarsčius pasiekiama, kad tarp sveriamos medžiagos ir svarsčių būtų pusiausvyra. Ši pusiausvyra nepriklauso nuo

pagreičio dydžio svėrimo vietoje. Svėrimo rezultatas reiškiamas masės kilogramais – *kg* (iki šiol dažnai vadinama „svoriu“).

Taigi, kalbant apie smėlio, cemento krosnyse degimui sunaudojamo kuro kiekį ir kt., reikia vartoti masės sąvoką.

Kūno sunkio jėga, arba sunkiu, vadinama jėga, kuria kūnas, veikiamas Žemės traukos, slegia atraminį paviršių. Kūno svoris yra kintamas dydis. Jis priklauso nuo pagreičio matavimo vietoje – kūno svoris Žemės poliuose didesnis negu pusiaujuje, ir mažėja, tolstant kūnui nuo Žemės paviršiaus. Kūno svoris nustatomas dinamometriniais prietaisais arba spyruoklinėmis svarstyklėmis. Pavyzdžiui, krosnies agregato svorį (nustatant slėgį į pamatus), sniego svorį (nustatant sniego dangos krūvį ant stogo) ir kt. reikia vadinti sunkio jėga ir reikšti jėgos vienetais – niutonais (*N*).

Jėgos vienetas SI sistemoje yra *niutonas* (N), t. y. jėga *(F),* kuri 1 kg masei (*m*) suteikia pagreitį (*a*), lygų 1 m/s^2. Jėgos vieneto dimensija:

$$(F) = (m)\cdot(a) = kg \cdot \frac{m}{s^2} = kg \cdot m \cdot s^{-2} = m \cdot kg \cdot s^{-2}.$$

Niutonas (*N*) apytiksliai dešimt kartų mažesnis už plačiai vartojamą jėgos kilogramą (*kgf*), o kiloniutonas (*kN*) – apie dešimtį kartų mažesnis už jėgos toną (*tf*):

$$1\ kgf = 980\,665\ dyn = 9{,}80665\ N \approx 9{,}81\ N.$$

Tankis ρ – yra medžiagos tūrio vieneto masė:

$$\rho = \frac{m}{V};$$

čia ρ – tankis, kg/m^3; m – kūno masė, kg; V – kūno tūris, m^3.

Tankio vienetu laikomas tankis tokios medžiagos, kurios 1 m^3 yra 1 kg masės (*kg/m^3*) (pvz., vandens tankis *SI* sistemoje lygus 1000 kg/m^3, gyvsidabrio – 13 595 kg/m^3, geležies – 7900 kg/m^3 ir pan.).

Savituoju svoriu vadinama medžiagos tūrio vieneto svorio jėga (svoris). Medžiagos savitasis svoris (γ) yra kintamas dydis – jis priklauso nuo laisvojo kritimo pagreičio g matavimo taške:

$$\gamma = \frac{G}{V};$$

čia γ – savitasis svoris, N/m^3; G – medžiagos svorio jėga, N; V – medžiagos tūris, m^3;

arba:

$$\gamma = \rho \cdot g;$$

čia ρ – medžiagos tankis, kg/m^3; g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2.

Savitojo svorio vienetu laikomas svoris tokios medžiagos, kurios 1 m^3 sveria 1 N (N/m^3).

Savituoju svoriu dažnai klaidingai vadinamas medžiagos, t. y. masės, kiekis, atitinkąs tūrio vienetą, kitaip tariant, savitasis svoris painiojamas su tankiu, kurio matavimo vienetas yra kg/m^3 (pvz., vandens savitasis svoris yra 9810 N/m^3, gyvsidabrio – $1{,}33 \cdot 10^5$ N/m^3, geležies – $7{,}8 \cdot 10^4$ N/m^3 ir t. t.).

Savituoju tūriu, V_0, vadinamas tūris, kurį užima medžiagos masės vienetas:

$$V_0 = \frac{V}{m};$$

čia V – tūris, kurį užima m masės kūnas.

Savitojo tūrio vienetu laikomas tūris tokios medžiagos, kurios 1 kg masė užima 1 m^3 tūrį (m^3/kg).

Technikoje dažnai vartojama santykinio (lyginamojo) tankio *(d)* sąvoka, t. y. tiriamojo kūno tankio (ρ) ir standartinio kūno tankio (ρ_0) santykis:

$$d = \frac{\rho}{\rho_0}.$$

Nustatant kietųjų kūnų ir skysčių santykinį tankį, standartiniu laikomas vandens tankis 3,98 °C temperatūroje, dujų – sauso atmosferos oro tankis, statybinių ir kitų medžiagų – absoliučiai tankios tos medžiagos tankis ir kt.

Kalbant apie statybines ir kitas į jas panašias medžiagas bei gaminius, reikėtų skirti:

a) *tikrąjį tankį* (kg/m^3) – absoliučiai tankios medžiagos masės ir tūrio santykį;

b) *vidutinį tankį* (kg/m^3) – natūralios būsenos medžiagos arba gaminių masės ir tūrio santykį;

c) *santykinį tankį* (bematis dydis) – medžiagos vidutinio ir tikrojo tankio santykį.

SI sistemos *slėgio vienetas* yra niutonas metrui kvadratu (N/m^2), t. y. paskalis *Pa*.

Darbo, energijos, šilumos kiekio vienetas SI matavimo vienetų sistemoje yra džaulis (*J*):

$$1\,J = 1\,N \cdot m = 1\,W \cdot s = 10^7\,erg.$$

Šiluminėje technikoje šilumos kiekiui matuoti šis vienetas yra per mažas, todėl čia vartojamas kilodžaulis (*kJ*). Anksčiau vartotas šilumos kiekio vienetas kilokalorija (*kcal*):

1 kcal = 4,1868 kJ (apytiksliai 4,19 kJ).

Pvz., etaloninio (sąlyginio) kuro 1 kg kaloringumas bus toks:

7000 kcal·4,1868 kJ = 29 307,6 kJ;
suapvalinus 30 000 kJ = 30 MJ (megadžaulių).

Galios vienetas yra vatas (*W*) – tai galia, kai per 1 s atliekamas darbas, lygus 1 J (*W = J/s*).

Džaulis per sekundę apytiksliai lygus kilokalorijai per valandą, todėl šiluminių įrenginių našumą galima nusakyti vatais, bet tai ne elektrinė, o šiluminė galia.

$$1kcal/h = \frac{4186,8}{3600} J/s = 1,163\ W.$$

Norint šilumos srautą išreikšti standartiniais vienetais, reikia valandą pakeisti sekunde. Pavyzdžiui, šilumos laidumo koeficientą apskaičiuosime taip:

$$\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} = 1,163\frac{J}{m \cdot s \cdot K} = 1,163\frac{W}{m \cdot K} \text{ ir pan.}$$

Krosnių bei katilų dujinių degiklių, šilumokaičių ir kitų aparatų šiluminę galią reikia reikšti vatais arba jo kartotiniais dydžiais (*kW, MW, GW*).

Šiuo metu leidžiama naudoti dvi temperatūrines skales: termodinaminę – pagrindinę, kurioje temperatūra reiškiama kelvinais (*K*), ir tarptautinę – praktiniams matavimams, kurioje temperatūra reiškiama Celsijaus laipsniais (*°C*). Temperatūra, išreikšta *K*, dar vadinama absoliutine temperatūra *(T)*. Ji yra 273,15 laipsnio didesnė už temperatūrą, išreikštą *°C (t)*:

$$T = t + 273,15;$$
$$t = T - 273,15.$$

Absoliutinis nulis Kelvino skalėje atitinka -273,15 laipsnio Celsijaus skalėje (0 K = -273,15 °C). Kelvino laipsnio dydis yra lygus Celsijaus laipsniui, todėl temperatūros pokytis vienu °C yra lygus temperatūros pokyčiui vienu K.

Fizikinių dydžių, išreikštų kitų sistemų vienetais, perskaičiavimas į *SI* sistemos vienetus. Norint apskaičiuoti kurio nors dydžio arba konstantos skaitinę vertę *SI* vienetais, reikia: 1) parašyti to dydžio skaitinę vertę ir dimensiją (matmenį); 2) išreikšti į dimensiją įeinančių vienetų dydžius *SI* vienetais, atsižvelgiant į skaitinį šių dydžių santykį; 3) atlikti veiksmus su įrašytais skaičiais ir vienetais.

Pavyzdžiai

1. Išreikškime geležies tankį (ρ) *SI* vienetais. Geležies tankis *CGS* sistemoje $\rho = 7{,}9$ g/cm^3.

$1\ g = 10^{-3}\ kg;$

$1\ cm^3 = 1\cdot(10^{-2}m)^3 = 10^{-6}m^3;$

$$\rho = 7{,}9\frac{10^{-3}}{10^{-6}}\frac{kg}{m^2} = 7{,}9\cdot 10^3\ kg/m^3.$$

2. Išreikškime vandens savitąją šilumą *(c) SI* vienetais. *CGS* sistemos vienetais $c = 1{,}0\dfrac{cal}{g\cdot °C}$.

$1\ cal = 4{,}19\ J; \quad 1\ g = 10^{-3}\ kg;$

$$c = 1{,}0\frac{4{,}19}{10^{-3}}\frac{J}{kg\cdot K} = 4{,}19\cdot 10^3\frac{J}{kg\cdot K} = 4{,}19\frac{kJ}{kg\cdot K}.$$

3. Išreikškime naftos kaloringumą (Q) *SI* vienetais. Naftos $Q = 11000$ kcal/kg.

$1\ kcal = 4{,}19\ kJ, \ arba \ \ 1\ kcal = 4{,}19\cdot 10^3 J;$

$$Q = 11000\frac{4{,}19kJ}{kg} = 11000\frac{4{,}19\cdot 10^3 J}{kg} = 4{,}61\cdot 10^4\frac{kJ}{kg} = 4{,}61\frac{MJ}{kg} = 4{,}61\cdot 10^7\frac{J}{kg}.$$

4. Išreikškime geležies Jungo modulį *SI* vienetais. Žinome, kad geležies $E = 20000\dfrac{kgf}{mm^2}$.

$1\ kgf = 9{,}81\ N; \ 1\ mm = 10^{-3}m;$

$$E = 20000\frac{9{,}81N}{(10^{-3}m)^2} = 1{,}96\cdot 10^{11}\frac{N}{m^2} = 1{,}96\cdot 10^{11}Pa.$$

5. Išreikškime vandens paviršiaus įtempimą *SI* vienetais, kai $\sigma = 72\dfrac{\text{dyn}}{\text{cm}}$.

$1\ dyn = 10^{-5}N; \quad 1\ cm = 10^{-2}m;$

$$\sigma = 72\frac{10^{-5}}{10^{-2}}\frac{N}{m} = 72\cdot 10^{-3}\frac{N}{m} = 7{,}2\cdot 10^{-2}\frac{N}{m} \ \text{ arba } \ \sigma = 0{,}072\frac{N}{m}.$$

Svarbesniųjų matavimo vienetų perskaičiavimo lentelė

Masės vienetai

$1\ g = 10^{-3}\ kg$

$1\ kg = 10^{3}\ g$

$1\ t = 10^{3}\ kg$

$1\ kg = 10^{-3}\ t$

$1\ kg = 2{,}2046$ svaro

1 svaras = 0,453592 kg

Prekybiniai masės vienetai

16 drachmų = 1 uncija

2 stonai = 1 ketvirtis

16 uncijų = 1 svaras

4 ketvirčiai = 1 centneris

14 svarų = 1 stonas

20 centnerių = 1 tona

700 g = 1 svaras

Jėgos vienetai

$dyn = 10^{-5}\ N$

$1\ N = 10^{5}\ dyn$

$1\ kgf = 9{,}81\ N$

$1\ N = 0{,}102\ kgf$

$1\ tf = 9{,}81 \cdot 10^{3}\ N$

$1\ N = 1{,}02 \cdot 10^{-4}\ tf$

Galios vienetai

$erg/s = 10^{-7}\ W$

$1\ W = 10^{7}\ erg/s$

$1\ kgf \cdot m/s = 9{,}81\ W$

$1\ W = 0{,}102\ kgf \cdot m/s$

$1\ AG = 736\ W$

$1\ W = 1{,}36 \cdot 10^{-3}\ AG$

Slėgio vienetai

$1\ N/m^2 = 1\ Pa$

$1\ dyn/cm^2 = 0{,}1\ Pa$

$1\ Pa = 10\ dyn/cm^2$

$1\ kgf/m^2 = 9{,}81\ Pa$

$1\ Pa = 0{,}102\ kgf/m^2$

$1\ at\ (1\ kgf/cm^2) = 9{,}81 \cdot 10^{4}\ Pa$

$1\ Pa = 1{,}02 \cdot 10^{-5}\ at$

$1\ atm = 1{,}01 \cdot 10^{5}\ Pa$

$1\ Pa = 9{,}87 \cdot 10^{-6}\ atm$

$1\ mm\ Hg = 133\ Pa$

$1\ Pa = 7{,}50 \cdot 10^{-3}\ mm\ Hg$

$1\ mm\ H_2O = 9{,}81\ Pa$

$1\ Pa = 0{,}102\ mm\ H_2O$

$1\ bar = 10^{5}\ Pa$

$1\ Pa = 10^{-5}\ bar$

$1\ bar = 1{,}02\ kgf/cm^2 = 0{,}987\ atm = 750\ mm\ Hg$

$1\ kgf/cm^2 = 0{,}981\ bar = 0{,}968\ atm = 735{,}6\ mm\ Hg$

Darbo, energijos, šilumos vienetai

$1\ erg = 10^{-7} J$ $\qquad$ $1\ J = 10^{7} erg$

$1\ kgf{\cdot}m = 9{,}81\ J$ $\qquad$ $1\ J = 0{,}102\ kgf{\cdot}m$

$1\ cal = 4{,}19\ J$ $\qquad$ $1\ J = 0{,}239\ cal$

$1\ W{\cdot}h = 3{,}6{\cdot}10^{3}\ J$ $\qquad$ $1\ J = 2{,}78{\cdot}10^{-4}\ W{\cdot}h$

Sistemos šiluminė talpa $1\ kcal/°C = 4{,}19{\cdot}10^{3}\ J/K = 4{,}19\ kJ/K$

Specifinė šiluma $1\ kcal/(kg{\cdot}°C) = 4{,}19\ kJ/(kg{\cdot}K)$

Šilumos srautas $1\ kcal/h = 1{,}163\ W$

Šilumos srauto tankis $1\ kcal/(h{\cdot}m^2) = 1{,}163\ W/m^2$

Šilumos laidumo koeficientas $1\ kcal/(m{\cdot}h{\cdot}°C) = 1{,}163\ W/(m{\cdot}K)$

Šilumos atidavimo (perdavimo) koeficientas $1\ kcal/(m^2{\cdot}h{\cdot}°C)i = 1{,}163\ W/(m^2{\cdot}K)$

Temperatūrinio laidumo koeficientas $1\ m^2/h = 2{,}778{\cdot}10^{-4}\ m^2/s$

Kuro kaloringumas $1\ kcal/kg = 4{,}19{\cdot}10^{3}\ J/kg = 4{,}19\ k\ J/kg$

Sistemos entropija $1\ kcal/°C = 4{,}19\ kJ/K$

Savitoji entropija $1\ kcal/(kg{\cdot}°C) = 4{,}19\ kJ/(kg{\cdot}K)$

Dinaminė klampa $1\ P = 1\ dyn{\cdot}s/cm^2 = 0{,}1\ N{\cdot}s/m^2 = 0{,}1\ Pa{\cdot}s$

$1\ kgf{\cdot}s/m^2 = 9{,}81\ N{\cdot}s/m^2 = 9{,}81\ Pa{\cdot}s$

Kinematinė klampa $1\ St = 10^{-4}\ m^2/s;\ 1\ m^2/s = 10^{4}\ St$

Plokščiasis kampas $1° = \dfrac{\pi}{180}\ rad$

Posūkio kampas $1\ aps. = 2\pi\ rad$

Kampinis greitis $1\ aps./min = 1\ r/min = \dfrac{\pi}{30}\ rad/s$

Matematikos ženklų simbolika

grad- funkcijos gradientas (jos didžiausio didėjimo ar mažėjimo kryptis)	$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – Laplaso operatorius
const – pastovusis dydis	Π – sandauga
idem – tolygus	Σ – suma
lim – riba	$\lvert\ \rvert$ – absoliutusis dydis
max – didžiausias	o—• – palyginimo operacija
min – mažiausias	$\equiv$ – tolygumo ženklas; priskyrimas
opt – optimumas	$\sim$ – proporcingumas
var – kintamasis dydis	$\approx$ – apytikslė lygybė
Δ – skirtumas, padidėjimas	

Vadovėlyje vartojamos graikų ir lotynų kalbų raidės

Graikų			Lotynų		
mažosios	didžiosios	pavadinimas	mažosios	didžiosios	pavadinimas
α	A	alfa	q	Q	ku
β	B	beta	x	X	iksas
γ	Γ	gama	y	Y	igrekas
δ	Δ	delta	z	Z	zet arba zeta
ε	E	epsilon			
ζ	Z	dzeta			
η	H	eta			
ϑ	Θ	teta			
ι	I	jota			
κ	K	kapa			
λ	Λ	lambda			
μ	M	mi			
ν	N	ni			
ξ	Ξ	ksi			
o	O	omikron			
π	Π	pi			
ρ	P	ro			
σ	Σ	sigma			
τ	T	tau			
υ	Υ	ipsilon			
φ	Φ	fi			
χ	Y	chi			
ψ	Ψ	psi			
ω	Ω	omega			

LITERATŪRA

1. **Balandis A.** ir kt. Chemijos inžinerija. Skaičiavimų pavyzdžiai ir uždaviniai. – Kaunas: Technologija, 2000. – 408 p.
2. **Balandis A.** ir kt. Chemijos inžinerijos laboratoriniai darbai. – Kaunas: Technologija, 2003. – 148 p.
3. **Ciparis J.** ir kt. Cheminės technologijos procesai ir aparatai. – Antras pataisytas ir papildytas leidimas. – Vilnius: Mokslas, 1984. – 473 p.
4. **Leskauskas B. J.** ir kt. Vaistų technologija (trečias tomas). – Kaunas: KMU Spaudos ir leidybos centro leidykla, 2002. – 242 p.
5. **Robert H. Perry, Cecil H. Chilton**. Chemical Engineers' Handbook. – Fifth edition. TP151. C52, 1973.
6. **Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott.** Unit operations of chemical engineering. – Fourth Edition. 3 rd Printing, 1986.
7. **Perry R. H., Chilton C. H.** Chemical Engineers Handbook. – Fifth edition. TP151. C52, 1973.
8. **McCabe W. L., Smith J. C., Harriott P.** Unit operations of chemical engineering. Fourth Edition. 3 rd Printing, 1986.
9. **Аминов М. С., Мурадов М. С., Аминова Э. М.** Процессы и аппараты пищевых производств. – Москва: Колос, 1999. – 503 с.
10. **Дытнерский Ю. И.** Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. – Москва: Химия, 2002. –367 с.
11. **Дытнерский Ю. И.** Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. – Москва: Химия, 2002. –399 с.
12. **Фролов В. Ф.** Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». Учебник для ВУЗОВ. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2003. – 607 с.
13. **Пери Дж.** Справочник инженера химика. Т. 1-ый, перевод с англ. изд. – Ленинград: Химия, 1969. – 631 с.
14. **Пери Дж.** Справочник инженера химика. Т. 2-ой, перевод с англ. изд. – Ленинград: Химия, 1969. – 497 с.
15. **Чубик И. Ф., Маслов А. М.** Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. – Москва: Пищевая промышленность, 1970.
16. **Стабников В. Н., Лысянский В. М., Попов В. Д.** Основные процессы и аппараты пищевых производств. – Москва: Агропромиздат, 1985.
17. **Общий курс процессов и аппаратов химической технологии:** Учебник для ВУЗОВ: В 2 кн. Под ред. В. Г. Айнштейна. – Москва: «Лотос»; «Высшая школа», 2003. – Ч. 1. – 888 с.; Ч. 2. – 875 с.

DALYKINĖ RODYKLĖ

A

Aerozoliai 236
Agregacija 318, 417
Aparatai (taip pat žiūrėti pagal pavadinimą
vakuumfiltrai, ventiliatoriai ir kt.)
~ su maišikliu 87, 156-158, 168
tarpinio tipo ~ 88-90
~ su pseudoverdančiu sluoksniu 88, 130
~ su apvalkalu 22, 168-169, 173-174, 340-341, 348, 363-364, 372, 418, 420, 450
Aparatų
~ hidraulinis pasipriešinimas 95, 106, 111, 299
~ užsistovėjimo zona 81, 89, 94, 159, 251, 419-420
Archimedo
~ kriterijus 76, 131, 242, 457
~jėga 137, 240
Atgarsio kreivė 84, 87-93
Aukštis:
dinaminio slėgio ~ 103-105, 107, 110, 118, 148,
geometrinio slėgio ~ 103
hidrostatinio ~ 97,
statinio slėgio ~ 118
siurblio įsiurbimo ~ 187
siurblio slėgio ~ 201
nivelyrinis ~ 97

B

Balansas
impulso arba judėjimo kiekio ~ 24
medžiagų ~ 9, 18, 20, 53, 237, 239
energijos (šilumos) ~ 21, 78, 218
Barbotažas 137, 154
Bernulio lygtis 61, 65, 101-106, 112, 115, 178-179, 198
Bėgūnai 320, 345-350, 363
Būgniniai vakuuminiai filtrai 285
Buvimo arba prabuvimo trukmė 83-86, 90-92

C

Cheminiai aparatai 13, 41-42, 81, 112
Cheminiai reaktoriai 21
Cheminių technologinių procesų
~ fazių paviršiaus didinimas 137
~ intensyvinimas 367
~ varos jėga 238, 251, 266, 303
Centrifugos:
filtruojamosios ~ 257, 267, 276, 291-295, 304-305
nusodinamosios ~ 251, 253, 257-258, 261, 296, 391
nuolatinio veikimo ~257-258
periodinio veikimo ~257-258, 260
sulčių atskyrimo ~ 379
Centrifugų skaičiavimas 261
Chemijos potencialas 11, 26-27, 30
Ciklonas 252-257, 302, 305, 360, 367, 393, 422, 448-449
Ciklonų
~ baterija (multiciklonai) 254, 302, 367, 449
~ hidraulinis pasipriešinimas 256
~ skaičiavimas 256
~ dujų išvalymo laipsnis 255
~ parametrai 255
Cirkuliacija lašelio viduje 147, 244

D

Darsi lygtis 107
Deflokuliacija 303-304
Dezintegratoriai 312, 320, 345, 350, 354-355, 363, 418
Dėsnis
energijos, impulso, masės pernešimo ~ 54-56
energijos tvermės ~ 20-22, 97, 104
Gibso fazių ~ 28
impulso (judėjimo kiekio) tvermės ~ 14, 18, 23
masės tvermės ~ 9, 17-20, 53
Niutono vidinės trinties ~ 38, 40, 44, 48, 57, 148, 165, 403
Paskalio ~ 97-98
Stokso nusodinimo ~ 123
termodinaminės pusiausvyros ~ 15
Dismembratoriai 320, 350, 354-355, 363, 18
Difuzijos koeficientas 47, 56, 91
Difuzoriai 118, 171, 174, 206-207, 300-301, 391
Diskinis vakuuminis filtras 287-288
Dražė 409

Dujų
~ valymas 295-298, 300, 302-303
~ tankis 34, 112, 138, 172, 212, 219
~ suslėgimas 199, 211, 213, 215-217, 226-227
~ transportavimas 211-233
~išstūmimas 221
~suslėgimo laipsnis 211-213, 221-223, 225, 227, 231, 234
~ kiekis (turinys) 141
Dujopūtės:
vienpakopės ~ 213, 220-224, 231, 234
daugiapakopės ~ 213, 221, 223, 226-227, 231-233
Dulkių kameros 249, 264, 302

E
Efektas
siurblio ~ 157-158, 167, 170-171
pasienio ~ 125
Efektyvumas
dujų valymo ~ 263-264
maišymo ~ 154-155, 159
nevienalyčių sistemų perskyrimo ~ 261, 302
Ekvivalentinis
~ skersmuo 42, 108, 124-126, 140
~ plėvelės skersmuo 136
~ rutulys 122, 244, 246, 451-452
Elektriniai filtrai
plokštiniai ~ 262, 265
elektrodai ~ 262
vamzdiniai ~ 262, 265
Elektros filtrų skaičiavimai 266
Elevatoriai
kaušiniai ~ 392-393, 421-422, 424, 440-442
greitaeigiai ~ 440
lėtaeigiai ~ 440
Emulsijos perskyrimas 238, 251, 259
Erliftai (oriniai skysčio kėlikliai) 173, 207-208
Ežektoriai 207
Eulerio
~ kriterijus 75, 160, 162-163, 165, 457
~ lygtis 60-61, 65, 95, 101, 160, 199

F
Faktorius
perskyrimo ~ 251, 253-254, 257, 259-261
Filtravimas:
dujinių nevienalyčių sistemų ~ 236-237, 278-281,
suspensijų ~ 267-278, 281-291
Filtrai
rankoviniai ~ 278-281
vakuuminiai ~ 285-288
būgniniai ~ 285-286
elektriniai ~ 262-266, 296, 302-303, 367, 393, 449
juostiniai ~ 286-287
Filtrpresai
kameriniai ~ 284
rėminiai ~ 282-284
Flokuliacija – deflokuliacija 303-304
Flotacija 303-304, 321

G
Gibso fazių taisyklė 28
Granuliavimas
~ ridenimu 408
šlako ~ 410-411
~ dispersiniame sraute 408, 411
Grūdinis sluoksnis 124-125, 127, 131
Griebimo kampas 328-331, 335, 344, 347-348

H
Hageno-Puazeilio lygtis 105-107, 270
Hidraulinis presas 98, 405
Hidraulinis pasipriešinimas
~ vamzdžiuose 106, 109, 177, 181
~ aparatuose 95, 106, 111, 299
~ aptekant kietus kūnus 119-131
~ maišant 166, 172
ciklonų ~ 254
Hidrociklonai 253, 296, 304, 380, 391-392
Hidrodinamika
~ vykstant barbotažui 137-140
neniutoninių skysčių ~ 148-152
pseudoverdančio sluoksnio ~ 127-132
Hidrodinamikos
~ vidiniai uždaviniai 119, 124
~ išoriniai uždaviniai 119
~ srauto struktūra 22, 43, 82, 86, 88, 94, 107, 154
Hidrostatikos pagrindinė lygtis 61, 65, 95-96, 103
Hidrostatinis slėgis 36, 39, 47, 58, 63, 75, 97-98, 102, 112, 139, 266, 269, 281
Hidrostatinės mašinos 98
Homochroniškumo kriterijus 75-76
Homogenizatoriai 320, 373, 378-379

I
Impulsas 24-25, 37, 45, 47-48
Inžekcijos koeficientas 207
Inžektoriai 207

Išcentrinio siurblio:
~ konstrukcija 194-195
~ siurbliaratis (rotorius) 195
~ išvystomas slėgio aukštis 195
~ našumas 200
~ proporcingumo dėsnis 200-201
~ darbas tinkle 203
~ darbo taškas 204
~ pagrindinė lygtis 197
~ papagrindinė charakteristika 201
~ universali charakteristika 202

J

Jonizacija
~ smūginė 262
Jonizuojantis („vainikinis") elektrodas 263
Judėjimas
nenuostovusis ~ 41, 43, 56, 74-75, 114, 145
nuostovusis ~ 41, 52-53, 55-56, 65, 103, 105-106, 120, 126, 132, 138, 149, 156
priverstinis ~ 178
tolyginis ~ 131
Judėjimo kiekis arba impulsas 24-25, 37, 45, 47-48
Juostiniai vakuuminiai filtrai 286-287
Juostinių transporterių
~ atraminiai ritinėliai 422, 427, 430
~ juostos ir jų įtempimas 428
~ klasifikacija 428
~ našumas 427

K

Kavitacija 142, 181, 200
Karmano sūkurių kelias 120
Karuseliniai vakuuminiai filtrai 288
Kėlikliai
oriniai skysčio ~ 173, 207-208
pneumatiniai kietų smulkių medžiagų ~ 454
pneumatiniai skysčio ~ 193
Klampa
dinaminė ~ 39, 123, 149, 156, 160, 270, 290, 399, 403, 418, 465
kinematinė ~ 39
plastinė ~ 150
tariamoji ~ 150-151
turbulentinė ~ 45
Klasifikacija
hidraulinė ~ 380, 390-392
magnetinė ~ 397-398
mechaninė ~ 390
orinė (separatoriai)~ 380, 392-394
Klasifikatoriai
hidrauliniai mechaniniai ~ 390
hidrauliniai išcentriniai ~ 391
Koaguliacija 236, 303-304,415
Koeficientas:
čiurkšlės susiaurėjimo ~ 113
debito ~ 113-115, 117-118
greičio ~ 113
hidraulinis trinties ~ 107, 109, 124, 127, 152
dinaminės klampos ~ 39, 396
fasadinio pasipriešinimo ~ 121
formos ~ 122, 126
inžekcijos ~ 207
kompresoriaus naudingumo ~ 219
turbulentinės klampos ~ 45
siurblių naudingumo ~ 191, 206
susispaudimo ~ 34-35
trinties ~ 124, 127, 152, 329, 348, 350, 370, 380, 422, 424-426
Kompresoriai:
ašiniai ~ 232
daugiapakopiai ~ 213, 221, 223, 226-227, 231-233
dinaminiai ~ 230-233
išcentriniai ~ 230
opoziciniai ~ 224
rotaciniai ~ 227-229
~ su diferenciniu stūmokliu
stūmokliniai ~ 220-227
vandens žiedo ~ 228
Kompresorių:
~ galia 231
~ našumas 213,, 219, 221-222, 224-226, 229-233
~ naudingumo koeficientas 220, 222, 225, 227, 229, 231, 233-234
~ suslėgimo laipsnis 212-213, 222-223, 225, 227, 231, 234

L

Lygtis:
Adamaro ~ 245
apibendrintų kintamųjų ~ 72
Bernulio ~ 61, 65, 101-106, 112, 115, 178-179, 198
Hageno ir Puazeilio ~ 105-107, 270
pagrindinė hidrostatikos ~ 61, 65, 95-96, 103
Darsi ~ 107

debito ~ 40-41, 106-107,111, 126, 135, 200, 266, 431
debito pastovumo ~ 53, 133
Eulerio diferencinės skysčio pusiausvyros ~ 61, 95
hidrodinaminio apibendrintų kriterijų ~ 75
idealiųjų skysčių judėjimo (Eulerio) diferencinė ~ 60, 101
medžiagų balanso ~ 238,
Navjė ir Stokso ~ 59-63, 65, 73, 75, 77, 95, 101, 105-107,132-133, 151, 156
pagrindinė filtravimo ~ 272
vientisojo srauto ~ 50—54, 59-60, 13
Van der Valso ~ 213

M

Maišymas:
birių medžiagų ~ 412-418
cirkuliacinis ~ 174
mechaninis ~ 155-171
plastiškų masių ~ 418-419
pneumatinis ~ 172-174
suspensijų bei tešlų ~ 419-420
vibracinis ~ 175

Maišymo:
~ efektyvumas 154
~ energijos sąnaudos 162-164, 167
~ intensyvumas 154
~ intensifikavimas 169

Maišikliai:
greitaeigiai ~ 167, 171, 417-418
frezos formos ~ 171
inkariniai ~ 162, 167, 170
mentiniai ~ 161-162, 167, 171, 418-419
lėtaeigiai ~ 167, 170
propeleriniai ~ 161, 167, 171
rėminiai ~ 161, 167, 170
sraigtiniai ~ 167, 170, 413-414
~ su kreipiančiu vamzdžiu 170
turbininiai ~ 168, 171, 417

Maišiklių:
~ galingumas 161-162, 167
~ konstrukcija 167-171
~ sukimosi dažnis 161-162

Malūnai:
aerofol ~ 358-360
biseriniai ~ 359, 362
būgniniai ~ 358-360
koloidiniai ~ 362, 373-374
kūginiai ~ 365
peiliniai ~ 359, 363
plaktukiniai ~ 350
ritinėliniai ~ 358, 361
rutuliniai ~ 358-360, 363-367
sroviniai ~ 360
suspensijų dispergavimo ~ 371-374
ultragarsiniai ~ 363
valciniai ~359, 363
vibraciniai ~ 361
žiediniai ~ 359

Matematinio modeliavimo:
~ pagrindiniai etapai 77-80
~ formuluotė 77
~ matematinis aprašymas 78
~ rezultatų analizė 80

Matmenų analizės metodas 71

Matavimas
slėgio ~ 99
skysčio kiekio rezervuaruose ~ 100

Matavimo
~ diafragma 115-118
~ tūta 116-118

Medžiagų balansas
srauto ~ 53
lygtis ir jos išvedimas 238

Modeliavimas
matematinis ~ (skaitmeninio eksperimento metodas) 77-80
fizikinis ~ (apibendrintų kintamųjų metodas) 71-80

Molekulinės difuzijos koeficientas 47, 55-56

Monodispersinės sistemos 236

Montežiu 193

N

Narveliniai
~ srauto struktūros modeliai 89
~ reaktoriai 90

Nutčfiltrai 281

O

Oriniai skysčio kėlikliai (erliftai) 173, 207-208

P

Panašumas
geometrinis ~ 67
fizikinių dydžių ~ 67
laiko ~ 67
pradinių ir ribinių sąlygų ~ 67-68

Panašumo invariantai 68

Panašumo kriterijus:
Archimedo ~ 76, 131, 242, 457
Bio ~ 457

Eulerio ~ 75, 160, 162-163, 165, 457
Frudo ~ 75-76, 159, 166, 251, 412, 457
Furjė ~ 457
Galilėjaus ~ 76
Grashofo ~ 472
Geometrinio ~ 76
homochroniškumo ~ 75-76
Laplaso ~ 147
Liaščenkos ~ 242
modifikuotas Reinoldso ~ 152, 158, 160
Peklė 91, 472
Prandtlio ~ 472
Reinoldso ~ 42, 44, 60, 68, 74, 109, 114, 117, 119-122, 126-127, 131, 136, 240, 246, 472
Stantono ~ 472
Vėberio ~ 146-147, 472
Perskyrimo faktorius 251, 253-254, 257, 259-261
Pjaustymo įrengimai 374-377
Pneumatinis transportas 447-456
Pertrynimo aparatai 377-378
Presavimas
plastiškų masių ~ 403-406
birių medžiagų ~ 406-407
Presas
hidraulinis ~ 98, 405
sraigtinis ~ 405
valcinis ~ 403, 405
diskinis ~ 406
štampavimo ~ 405-406
juostinis ~ 405
Procesai
cheminiai ~ 11, 13, 77, 154
hidrodinaminiai ~ 9, 47, 56, 73-77, 95, 106-107, 270
hidromechaniniai ~ 9, 12, 15, 95
mechaniniai ~ 9, 11, 153, 307
Procesų varos jėga 82, 95, 106
Pseudovirimas 129-131
Pseudoverdantis sluoksnis 88, 127-132
Putų aparatai 296, 299, 302
Plaktukiniai trupintuvai 350-354

R

Rūkai 236

S

Savitasis
~ burbuliukų paviršius 140
~ darbas 198
~ filtravimo paviršius 285, 288
~ lakumas ~ 30
~ našumas 381-382
~ paviršius 124, 287, 309-310, 357-358
~ plovimo skysčio tūris 290
~ reletyvusis kietumas 310
~ svoris 34, 460-461
~ šiurkštumas 109
~ tūrinis pasipriešinimas 271
~ tūris 34-35, 54, 213, 226
Separatoriai
atvirojo ciklo ~ 392-393
inerciniai-gravitaciniai ~ 392-397
lėkštiniai ~ 395
magnetiniai ~ 397-399
uždarojo ciklo ~ 392-393
Sijojimas 380-390
Sietų klasifikacija 383
Sijotuvai
ardyniniai ~ 384-385
daugiabrauniai ~ 388
lankiniai ~ 389
horizontalieji vibraciniai ~ 387
sukamieji ~ 388
vibraciniai ~ 385-387
Sienelių šiurkštumas 42, 46, 108-110, 121
Siurbliai
ašiniai ~ 206
čiurkšliniai ~ 206-208
diafragminiai ~ 187
išcentriniai ~ 194-204
krumpliaratiniai ~ 190-191
membraniniai ~ 186
plunžeriniai ~ 185
rotaciniai ~ 192-193
sraigtiniai ~ 191-192
stūmokliniai ~ 182-190
sūkuriniai ~ 204-205
Siurblio
~ efektas 157
~ našumas 179
~ naudingoji galia 181
~ naudingumo koeficientas 182
~ sudaromo slėgio aukštis 179-180
~ veleno galia 181
~ variklio galia 182
Skersmuo
kritinis lašelio ~ 146
barbotažo metu gautų burbuliukų ~ 137-138
ekvivalentinis ~ 42, 108, 124-126, 140

Skysčiai
idealieji ~ 97, 101-103
realieji ~ 34-36, 97, 104, 199
lašeliniai ~ 34, 37-38, 40, 48, 129, 244
tamprūs ~ 34, 151, 244
neniutoniniai ~ 38, 148-152
niutoniniai ~ 38, 148-152
pseudoplastiniai ~ 149-152
dilatantiniai ~ 149-152
tiksotropiniai ~ 151
reopektaniniai ~ 151
Skysčių reologija 149, 152
Skysčių dispergavimas:
hidraulinis ~ 141
mechaninis ~ 142
pneumatinis ~ 142
Skysčių dispergavimo
~ terpė (dispersijos) 140-148
~ fazė (disperguota) 140-148
Skruberiai
tuščiaviduriai ~ 295-296
įkrautiniai ~ 295, 297
išcentriniai ~ 295, 297
Venturio ~ 295,
Slėgis
absoliutus ~ 34, 75
dinaminis (greičio) ~
hidrostatinis ~ 36, 39, 47, 58, 63, 75, 97-98, 102, 112, 139, 266, 269, 281
geometrinis ~ 96, 103, 105
skysčio ~ į indo dugną ir sieneles 36, 95-99
~ kapiliariniuose vamzdeliuose 99, 103-104
Slėgio matavimo prietaisai 99
Substancija 13-14, 17, 23, 25-26, 33, 45-46, 54
Substancijos balanso lygtis 46-50
Suslėgimo laipsnis 211-213, 220, 222-223, 225, 227, 231, 234
Smulkinimo laipsnis 308-309, 314-322, 328, 332, 334, 339, 342-343, 350, 353-355, 360-363, 365, 370, 379

T
Tankis
piltinis ~ 401, 422-423, 425-426, 431, 442
vidutinis ~ 34, 300
Transportavimas
dujų ~ 211-234
skysčių ~ 177-210
kietų medžiagų ~ 421-456
Transporteriai
grandikliniai ~ 438-440
grandininiai ~ 437-438
juostiniai ~ 427-437
plokšteliniai ~ 437
sraigtiniai ~ 442-446
ritinėliniai ~ 446-447
Trejeriai 394-395
Trupintuvai
kūginiai ~ 333-338
plaktukiniai ~ 350-354
valciniai ~ 338-345
žiauniniai ~ 323-332
Turbininės dujopūtės 211, 230-232
Turbokompresorius 211, 230-232

V
Vakuuminiai filtrai
būgniniai ~ 285
karuseliniai ~ 288
juostiniai ~ 286-287
Ventiliatoriai
Ašiniai ~ 323-233
Išcentriniai ~ 230-231
Reversiniai ~ 232

Alfredas BALANDIS, Aras KANTAUTAS,
Benonas LESKAUSKAS, Giedrius VAICKELIONIS,
Zenonas VALANČIUS

CHEMIJOS INŽINERIJA
I knyga

Vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams

Redagavo P. Dastikas

Išleido leidykla „Technologija“, K. Donelaičio g. 73, 44029 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas